

Diseño de un motor eléctrico en rueda para vehículos eléctricos experimentales

Design of an electric motor in wheel for experimental electric vehicles

José Alejandro Cáceres Corrales

Ingeniero Mecánico y de Automatización Industrial
alejandro.caceres95@gmail.com

RESUMEN

Este proyecto tiene como objetivo realizar el diseño teórico de un motor capaz de ser acoplado a la rueda de un automóvil. El motor seleccionado es del tipo Brushless DC o Sin escobillas, siendo su principal característica la utilización de imanes permanentes y la buena relación que existe en la potencia desarrollada y su tamaño.

Durante la primera parte del trabajo se describen las principales características del motor, las configuraciones y posibles formas de construcción, además del modo básico de funcionamiento. En el capítulo siguiente se desarrolla la ingeniería del proyecto, donde se determinan los parámetros específicos de motor como la potencia 40 kw, la velocidad angular 2600 RPM y la alimentación requerida 800v DC. Finalmente, se explica la selección de los imanes permanentes, el número de ranuras, el número de polos magnéticos y los parámetros magnéticos y eléctricos necesarios.

También se realizó una simulación empleando el programa ANSYS MAXWELL y la herramienta RMXprt; los valores obtenidos durante la simulación presentan similitudes con los calculados. Otra parte fundamental de un motor Brushless DC es el circuito de conmutación, el cual también está desarrollado en el presente proyecto, seleccionando el PIC 16F887 para realizar esta tarea.

Palabras clave: Motor eléctrico. Motor en rueda. Motor sin escobillas. Fuerza contra electromotriz.

ABSTRACT

This project aims to perform the theoretical design of an engine capable of being coupled to the wheel of a car, the engine selected is Brushless DC type, the main feature of this motor is the use of permanent magnets and the good relationship that exists in the developed power and its size.

During the first part of the work, the main characteristics of the motor, the configurations and possible forms of construction, as well as the basic mode of operation are explored. In the next chapter the project engineering is developed where the specific motor parameters are determined, such as the 40 Kw power, the 2600 RPM angular speed and the 800v DC required power supply. Finally, the selection of permanent magnets, the number of slots, the number of magnetic poles and the necessary magnetic and electrical parameters are developed.

A simulation was also performed using the ANSYS MAXWELL program and the RMXprt tool, the values obtained during the simulation have similarities with those calculated. Another fundamental part of a Brushless DC motor is the switching circuit which is also developed in the present project, the PIC 16F887 was selected to perform this task.

Keywords: Electric motor. Wheel motor. Brushless motor. Back electromotive force.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la industria automovilística ha ido desarrollando nuevas tecnologías para el diseño de automóviles más eficientes que efectúen bajas emisiones de CO₂; sin embargo, aunque se han conseguido significativos avances, no se ha logrado reducir esta situación de manera contundente. Esto se debe a que gran parte de los vehículos fabricados utilizan actualmente un motor de combustión interna, por ello siempre se tendrá como consecuencia gases de combustión.

Una alternativa en la que se ha ido trabajando es en la implementación de motores eléctricos para la impulsión de los vehículos.

La Universidad Privada del Valle, a través del Centro de Investigación e Innovación Automotriz (CIIA), ha estado trabajado en proyectos de investigación que involucran nuevas tecnologías para el desarrollo de Vehículo Eléctrico (VE). Uno de estos es el desarrollo de un motor "En Rueda", o mejor conocido como motor "In Wheel", que tiene la particular característica de ser acoplado directamente en la rueda del automóvil, como su nombre lo indica.

Existe una gran variedad de motores eléctricos en la actualidad y algunos de estos –debido a sus características– pueden ser acoplados en una rueda, otorgándoles así su denominativo de motor. Entre los más prometedores tenemos al de Reluctancia Conmutado (SRM) y al Sin escobillas DC o Motor Brushless DC. Este trabajo se centra en el diseño eléctrico este último, que no presenta necesidad de usar carbones para la conmutación. Para ello, se determinaron sus dimensiones, elementos rotóricos y estáticos para una potencia y torque específicos.

Por lo anterior, con el fin de aportar conocimientos al Centro de Investigación e Innovación Automotriz (CIIA) UNIVALLE sobre el desarrollo de

un Motor Brushless DC del tipo "In Wheel", este trabajo presenta la respuesta a la pregunta de investigación: ¿cómo se puede realizar el diseño de un Motor Sin Escobillas o Brushless DC de 40kw de potencia, capaz ser acoplado a la rueda de un automóvil eléctrico experimental?

METODOLOGÍA

Motor Brushless DC

Los motores de corriente continua sin escobillas (BLDC) corresponden al grupo que están ganando popularidad rápidamente. Se utilizan en industrias de electrodomésticos, automotriz, aeroespacial, consumo médico, automatización industrial, equipo e instrumentación. Como su nombre lo indica, no usan escobillas para la conmutación, pues son conmutados electrónicamente.

Los motores BLDC ellas son:

- Mejor velocidad en comparación con las características de par
- Alta respuesta dinámica
- Alta eficiencia
- Larga vida útil
- Operación silenciosa
- Rangos de velocidad más altos

Además, la proporción de torque entregada al tamaño del motor es más alto, por lo que es útil en aplicaciones donde el espacio y el peso son factores críticos.

Los motores BLDC son un tipo de motor síncrono. Esto significa que el campo magnético generado por el estator y el campo magnético generado por el rotor giran en la misma frecuencia. No experimentan el "deslizamiento" que normalmente se ve en los motores de inducción.

Datos de Inicio

Diseñar un motor para una aplicación específica es una excelente oportunidad para conocer su funcionamiento de una forma muy profunda; sin embargo, es una actividad muy poco frecuente, pues en la mayoría de los casos los motores

son simplemente seleccionados debido a la amplia variedad existente en el mercado. En este caso, el motor requerido es muy especial y aún no se lo puede adquirir fácilmente, por lo que el modelo diseñado para este trabajo será destinado a la impulsión de un automóvil.

Al tratarse de un proyecto que se realiza para el CIA de la Universidad Privada del Valle, algunos parámetros fundamentales ya fueron establecidos, como la potencia mecánica del motor P_m , el diámetro exterior del motor (que necesariamente debe tener la capacidad de ser acoplado en una rueda, así que debe ser menor al diámetro de un aro 14) y la velocidad de rotación w_m , que será asignada por el proyectista.

Con estos datos ya definidos, se comienza con el cálculo de los parámetros fundamentales. Para ello, se iniciará con encontrar el torque desarrollado por el motor.

Datos de inicio:

$$P_m = 40 \text{ Kw}$$

$$w_m = 2600 \text{ r.p.m}$$

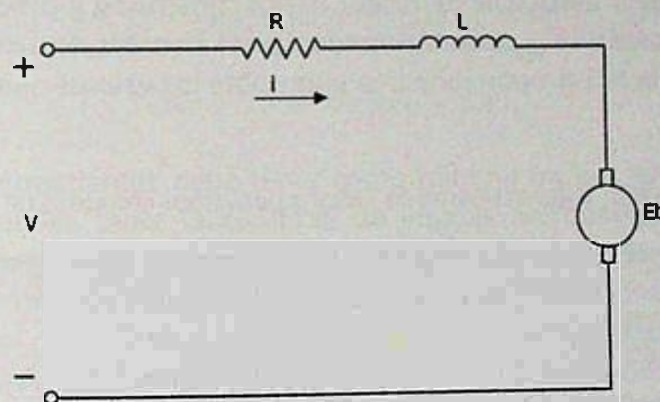
$$T = \frac{P_m}{w_m}$$

$$T = 146,91 \text{ N.m}$$

El dato de torque desarrollado será de gran importancia más adelante. El Torque T junto con la fuerza contraelectromotriz E_b son parámetros fundamentales en el diseño de un motor eléctrico sin escobillas, la fuerza contra electromotriz en una fase -de acuerdo con la siguiente gráfica- viene expresada de la siguiente manera:

$$V = R * i + L * \frac{di}{dt} + E_b$$

Figura N°1. Circuito equivalente monofásico de un motor BLDC



Fuente: Elaboración Propia, 2018

En régimen permanente y despejado la fuerza contra electromotriz se obtiene:

$$E_b = V - i * R$$

Donde V es el voltaje otorgado por una fuente independiente que debe ser seccionada, i es la corriente que circula por la fase y R es la resistencia de bobinado por fase. De estas variables, la única conocida es el voltaje de la fuente; para este proyecto se determinó el valor de 800v, para una aplicación automotriz se tendrían que realizar estudios posteriores, de modo que se pueda acoplar una batería

de esta capacidad en un automóvil (empresas de desarrollo automotriz ya tienen esta tecnología actualmente).

Debido a que el valor de la resistencia en el bobinado es muy pequeño, el resultado de $i * R$ será de igual manera un valor reducido, los valores de voltaje de la fuente y la fuerza contraelectromotriz serán muy parecidos y—por lo tanto— se supondrán que son iguales para un primer análisis, entonces:

$$Eb \approx V$$

Con estos datos ya determinados, se procederá a determinar el tamaño de motor.

Tamaño del Motor

Definir el tamaño del motor para producir un torque específico es fundamental en el diseño de motores eléctricos, mas existe la pregunta: ¿qué tan grande tiene que ser un motor para producir un par requerido? La respuesta a esta interrogante está dada por la siguiente ecuación.

$$K_{TRV} = \frac{|T|}{\pi * R_{ro}^2 * L_{st}} = \frac{2 * N_m * B_g * N * i}{\pi * R_{ro}}$$

Donde T es el torque desarrollado, R_{ro} es el radio del rotor, L_{st} es la longitud axial, N_m es el número de imanes, N es el número de vueltas e i es la corriente.

La constante K_{TRV} puede ser definida como el "Torque por unidad de volumen del rotor", esta expresión es la que nos da una idea aproximada del tamaño del motor y es conveniente tomarla como punto de partida para el diseño (Hanselman, 2006).

La mejor manera de adquirir un valor típico de K_{TRV} es por experiencia. Un ingeniero que esté familiarizado con un diseño particular de motor habrá construido y probado varios y los datos de prueba proporcionan valores de K_{TRV} correlacionados con el aumento de temperatura, cargas eléctricas y magnéticas, etc. La tabla N°1 proporciona una guía sobre los valores que podrían ser esperados en la práctica.

Tabla N°1. Valores típicos de TRV y σ para tipos comunes de motor

Tipo y tamaño de motor	σ (p.s.i.)	TRV ($kN*m/m^3$)
Motor Industrial Fraccionario TEFC	0.1- 0.3	1.4 - 4
Motor Industrial Integral TEFC	0.5 - 2	15-30
Servos Industriales de alto rendimiento	1.5-3	20-45
Máquinas aeroespaciales	3-5	45- 75
Máquinas muy grandes refrigeradas por liquido (turbinas y generadores)	10-15	130-220

Fuente: Miller, 1989

Selección de imanes permanentes y número de polos

Seleccionar un imán no es una tarea fácil, pues son materiales muy costosos y las dimensiones en las que se presentan son poco frecuentes en el diseño de motores BLDC, ya que diseñar un motor para una tarea específica es poco común.

Además de las dimensiones del imán, es muy importante determinar el valor de remanencia B_r , ya que este será fundamental al resolver el circuito magnético del motor y hallar la densidad de flujo del entrehierro. También se requiere conocer la temperatura a la que empieza a perder sus propiedades magnéticas.

El imán seleccionado es neodimio, que forma parte de la familia de imanes de tierras raras y son los más poderosos permanentes en el mundo. También se conocen como los imanes de NdFeB, porque se componen principalmente de neodimio (Nd), hierro (Fe) y boro (B). Seleccionado de acuerdo a un catálogo comercial, se tienen las siguientes características:

Tabla N°2. Características del imán permanente seleccionado

Longitud A [mm]	Ancho B [mm]	Espesor C [mm]	Calidad	Magnetización
100	30	10	N35	N

Fuente: Borrachas Técnicas MGO Unipessoal Lda, 2005.

Además de estos datos obtenidos, es importante considerar las características de la calidad de imán de neodimio N35.

Tabla N°3. Hoja de datos de imanes de neodimio, hierro boro.

Nxx Material	Br		Hc(Hcb)		Hci(Hcj)		Bmax	
	mT	G	kA/m	Oe	kA/m	Oe	kJ/m ³	MGOe
N35	1.170	11.700	867	10.900	955	12.000	263	33

Fuente: Eclipse Magnetics. SND.

Todo motor de imanes permanentes debe tener como mínimo un par de polos; sin embargo, los motores sin escobillas pueden tener la cantidad de imanes permanentes que el diseñador vea conveniente. Los polos magnéticos enfrentados en el rotor crean las medias eléctricas, a raíz de esto nace la frecuencia en medida eléctrica que es la que determinará la velocidad de conmutación cuando se realiza el control de velocidad en el motor eléctrico; un mayor número de imanes supone una frecuencia eléctrica (f) mucho más alta y esto influye en el diseño de la electrónica de potencia utilizada para accionar el motor. No obstante, a medida que disminuye el recuento de polos del imán, disminuye la eficiencia de producción del par (Hanselman, 2006).

Para el presente proyecto, se determinó la cantidad de polos magnéticos que pueden ser acoplados al motor de acuerdo a la medida del diámetro del rotor y las dimensiones del imán permanente.

La longitud de una circunferencia viene dada por:

$$L_{cro} = \pi * D_{ro}$$

$$L_{cro} = 0,728m$$

El ancho del imán permanente L_p es de 0,03 m, entonces

$$N_m = \frac{L_{cro}}{L_A}$$

$$N_m \approx 24 u$$

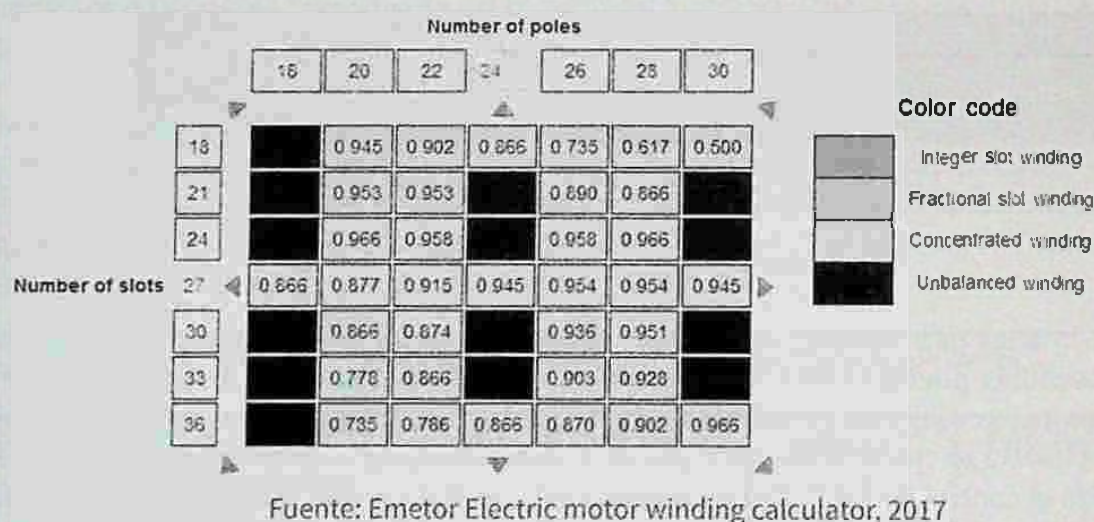
Número de Ranuras

La selección de número de ranuras viene dada por la relación que existe entre ranura/polo; se han realizado diversos análisis por computadora para obtener valores normalizados. Estos valores pueden ser obtenidos en la investigación realizada por James R. Hendershot; sin embargo, los valores encontrados en este texto son para máquinas hasta 16 polos.

En una investigación más reciente se realizó un análisis para motores de 18 polos para adelante, empleando devanados concentrados, que es el utilizado en este trabajo. La investigación concluye en que las combinaciones de ranuras y polos con un alto factor de debando aseguran un mejor rendimiento de la máquina y permite evitar un alto ruido magnético (Libert, SND). Los valores típicos de factor de debando en motores eléctricos de tres fases están entre 0,85 y 0,95.

Con esto en mente se procedió a encontrar una relación apropiada para los 24 polos que logren conseguir un factor de debando entre los valores mencionados anteriormente.

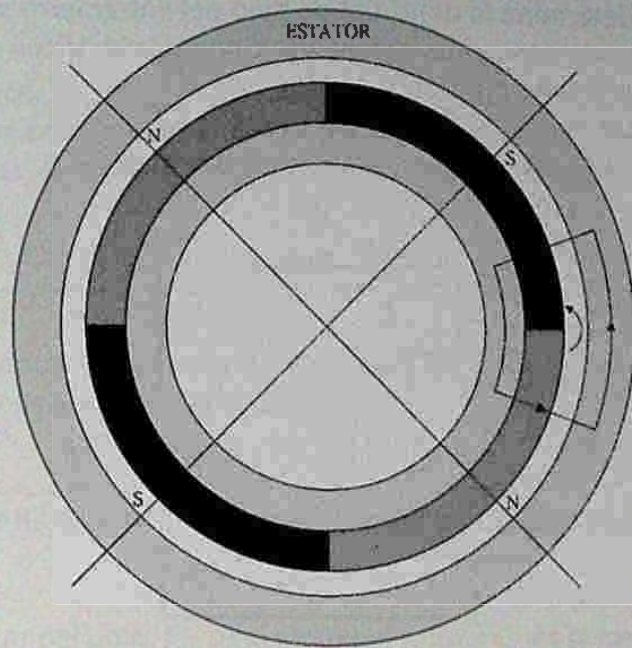
Figura N°2. Factor de devanado



Modelado magnético

Para cálculos posteriores, es necesario encontrar la densidad de flujo del entrehierro B_g . El análisis se realizará a partir de un motor simplificado (ver figura N°3); se trata de un motor Brushless de cuatro polos magnéticos alrededor del entrehierro y el estator se muestra sin ranuras o devanados. Se puede observar en la gráfica que el flujo del imán sale de los polos norte, cruza el entrehierro y atraviesa el estator hacia el lado del polo sur, cruza nuevamente el entrehierro e ingresa al polo sur del imán permanente cerrando el circuito al atravesar el rotor.

Figura N°3. Estructura fundamental del motor y trayectorias de flujo

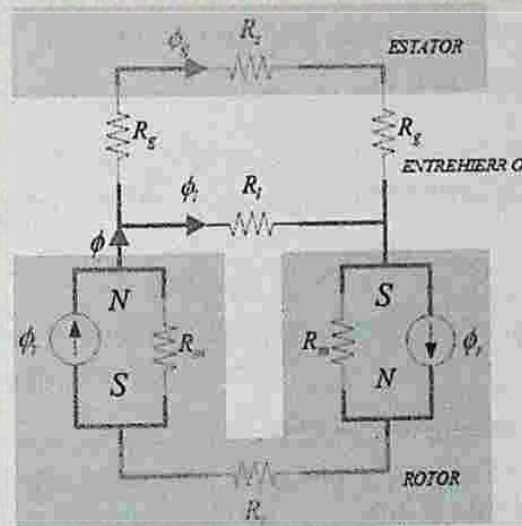


Fuente: Jung-Moo Seo, 2011. p.2.

Debido a que las trayectorias de flujo mostradas en la figura N°3 se repiten para cada par de polos adyacentes, sólo es necesario modelar un par como se muestra en la figura N°4. En esta figura, las áreas de acero del rotor y del estator son modeladas simplemente como reluctancias R_r y R_s , respectivamente. Los dos imanes medios son modelados como fuente de flujo ϕ_r y reluctancia de imán asociada R_m , con la dirección de la fuente de flujo que dicta la polaridad del imán (Hanselman, 2006).

El flujo fluye desde los imanes a través del entrehierro hacia el estator a través de las reluctancias del entrehierro denotadas por R_g . El flujo de fuga de un imán a otro fluye a través de la reluctancia de fuga R_f . Los tres flujos del circuito son el flujo del imán ϕ , el flujo del entre hierro ϕ_g y el flujo de la fuga ϕ_f .

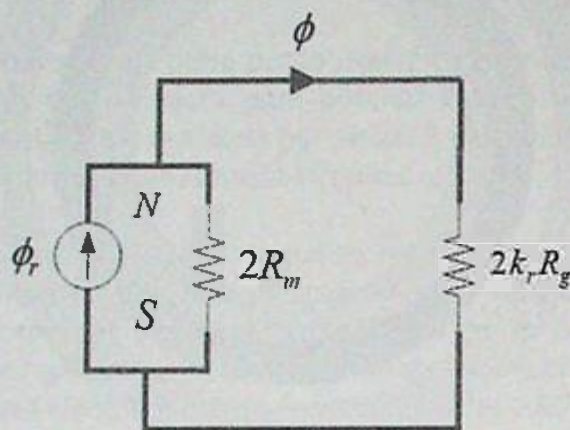
Figura N° 4. Modelo de circuito Magnético



Fuente: Hanselman, 2006. p.69.

El circuito magnético debe ser simplificado para encontrar la densidad de flujo del entrehierro B_g , de modo que la relación que determina la densidad de flujo del entrehierro se fácil de hallar. Se puede simplificar el circuito utilizando conceptos propios de circuitos eléctricos que llevan una semejanza con los circuitos magnéticos (ver figura N°5).

Figura N°5. Resolución del circuito magnético



Fuente: Hanselman, 2006. p.70.

A partir del circuito magnético (ver figura N°5) se puede expresar el flujo magnético utilizando la división de flujo (es decir, como en la división de corriente entre resistencias en un circuito eléctrico).

$$\phi = \frac{2 * R_m}{2 * R_m + 2 * K_r * R_g} * \phi_r = \frac{1}{1 + K_r * \frac{R_g}{R_m}} * \phi_r$$

Tomando en cuenta los factores de corrección, factor de fuga K_l y el factor de reluctancia K_r , la ecuación anterior se describe del siguiente modo:

$$\phi_g = K_l * \phi = \frac{K_l}{1 + K_r * \frac{\mu_R * g * A_m}{l_m * A_g}} * \phi_r$$

Donde l_m y A_m son la longitud del imán permanente a lo largo de la dirección de magnetización; en este caso, el espesor y el área transversal del imán respectivamente g y A_g son la longitud y área transversal del entrehierro respectivamente.

Reemplazando las relaciones de densidad de flujo $B_g = \phi_g / A_g$ y $B_r = \phi_r / A_r$ el factor de concentración de flujo $C_\phi = A_m / A_g$ y el coeficiente de permanencia $P_c = l_m / g * C_\phi$ la densidad de flujo en el entrehierro queda de la siguiente manera:

$$B_g = \frac{K_l * C_\phi}{1 + K_r * \frac{\mu_R}{P_c}} * B_r$$

Fuerza contra electromotriz y torque desarrollado

La fuerza contra electromotriz es el potencial que se genera en una bobina cuando se conecta a un potencial exterior V . La expresión de la fuerza contra electromotriz viene dada por:

$$e_b = \frac{d\lambda}{dt}$$

Donde λ es el flujo de enlace.

Realizando algunas operaciones matemáticas podemos expresar el FCEM en función del número de imanes N_m , la velocidad mecánica de la máquina w_m , el número devueltas en la ranura N y el flujo que atraviesa el entrehierro ϕ_g .

$$e_b = \frac{d\lambda}{dt} = \frac{d\theta_e}{dt} \frac{d\lambda}{d\theta_e} = w_e \frac{d\lambda}{d\theta_e} = \frac{N_m}{2} w_m \frac{d\lambda}{d\theta_e} = \frac{N_m}{2} w_m \frac{2N\phi_g}{\pi}$$

La velocidad angular mecánica viene expresada en $radM/seg$

El flujo del entrehierro puede ser expresado como:

$$\phi_g = B_g * A_g$$

Donde B_g es la densidad de flujo ya modificado por el coeficiente de Carter y A_g es el área del entrehierro.

$$A_g = R_{ro} * \theta_p * L_{st}$$

Donde θ_p es el paso angular del polo, R_{ro} es el radio del rotor y L_{st} es la longitud axial. Entonces el flujo de entrehierro puede ser escrito de la siguiente manera.

$$\phi_g = B_g * R_{ro} * \theta_p * L_{st} = \frac{2 * \pi}{N_m} * B_g * L_{st} * R_{ro}$$

Remplazando el flujo del entrehierro en la ecuación anterior obtenemos:

$$e_b = \frac{N_m}{2} * w_m * \frac{2N}{\pi} \left(\frac{2 * \pi}{N_m} * B_g * L_{st} * R_{ro} \right) = 2NB_g L_{st} R_{ro} w_m$$

Para encontrar una relación entre la fuerza contra electromotriz y el torque desarrollado se debe recurrir a las relaciones fundamentales de potencia eléctrica P_e y potencia mecánica P_m .

La potencia eléctrica suministrada a una barra de cobre en un campo magnético viene dada por la siguiente expresión:

$$P_e = e_b * i = BLvi$$

La potencia mecánica viene dada por:

$$P_m = F * v$$

La fuerza F en un cable que transporta una corriente i en un campo magnético uniforme B es descrita como:

$$F = B Li$$

La potencia se puede escribir como:

$$P_m = BLvi$$

Entonces, se puede afirmar que la potencia eléctrica suministrada es igual a la potencia mecánica que se genera y se puede llegar a la siguiente expresión:

$$e_b * i = T * w_m$$

A partir de esta expresión podemos deducir el torque generado.

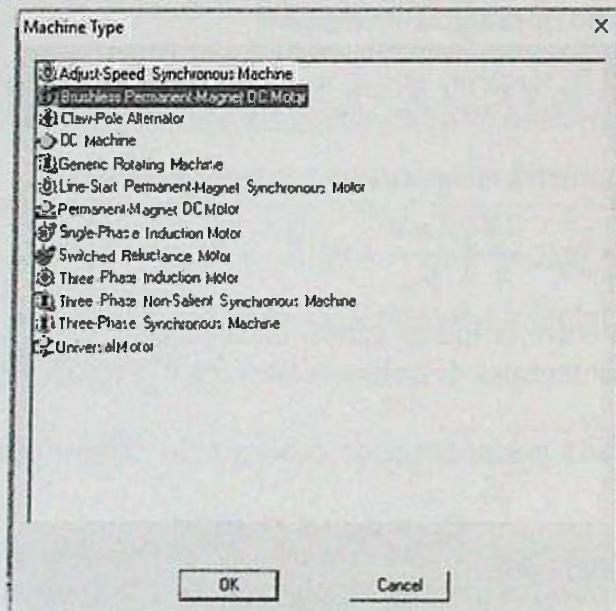
$$T = \frac{e_b * i}{W_m} = 2NB_g L_{st} R_{ro} i$$

Simulación Aplicando el software Ansys Maxwell

RMxpert Rotating Machine Expert es una herramienta de diseño basada en plantillas del paquete ANSYS Maxwell que se utiliza para crear un diseño de máquina personalizado para satisfacer la demanda a mayor eficiencia. Utilizando la teoría clásica del motor analítico y los métodos equivalentes de circuitos magnéticos, RMxpert puede calcular el rendimiento de la máquina, tomar decisiones iniciales de dimensionamiento y realizar numerosos análisis. RMxpert puede configurar automáticamente un proyecto completo de Maxwell (2-D / 3-D) que incluye geometría, materiales y condiciones de contorno. La configuración incluye las simetrías y excitaciones apropiadas con la topología del circuito de acoplamiento para un análisis electromagnético (Prathamesh, 2016).

Se comienza seleccionando el tipo de motor del cual se quiere realizar el diseño (se puede realizar esto utilizando el botón de insertar diseño RMxpert). La siguiente figura nos muestra la cantidad de motores que pueden ser analizados con esta herramienta.

Figura N°6. Ventana de selección de máquina

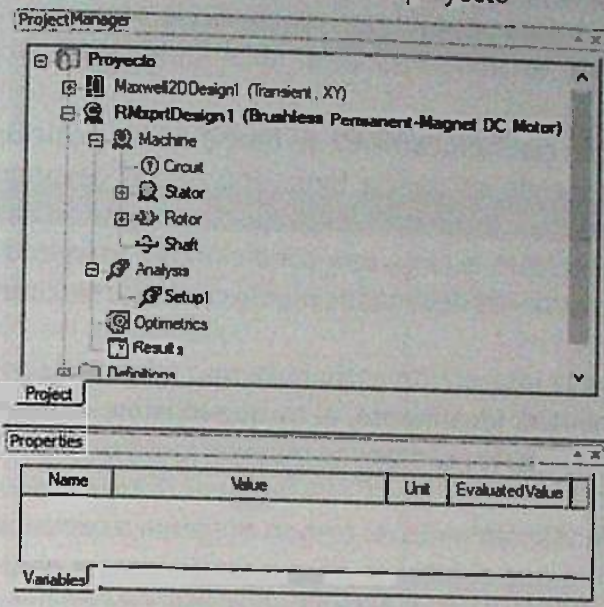


Fuente: Ansys Maxwell, 2018

Una vez seleccionado el motor a ser objeto de análisis, se obtendrá una ventana de proyecto donde se ingresarán los datos relevantes del motor en los distintos elementos que lo componen, estos son:

- a) Propiedades del motor
- b) Circuito de control
- c) Estator
 - Dimensionado de ranura
 - Devanado
 - Aislamiento
- d) Rotor
 - Polo magnético

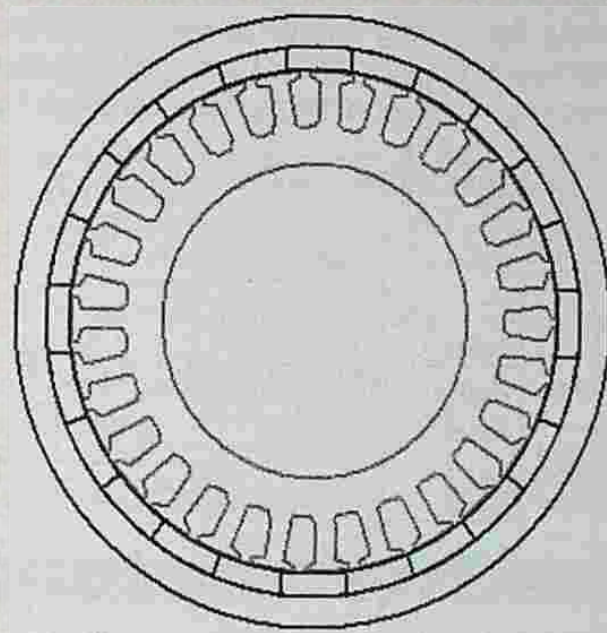
Figura N°7. Ventana de proyecto



Fuente: Ansys Maxwell, 2018

finalmente, se realiza la simulación determinando el voltaje de alimentación, la velocidad angular y la potencia desarrollada por el motor.

Figura N°8. Motor Brushless DC en simulación



Fuente: Ansys Maxwell, 2018

Accionamiento del motor Brushless DC

Uno de los elementos imprescindibles de los motores BLDC es su circuito de conmutación electrónica, sin el cual su funcionamiento no sería posible. El circuito de conmutación es posible gracias a los avances en la tecnología, especialmente en lo que respecta a micro controladores, microprocesadores y elementos semiconductores que trabajan a altas frecuencias como transistores, tiristores, Mosfets de potencia e IGBTs. Otro elemento importante es el sensor de posición, que se utiliza para conocer la

posición de los imanes permanentes y poder realizar una conmutación más precisa en el bobinado de estor del motor.

Modo de operación

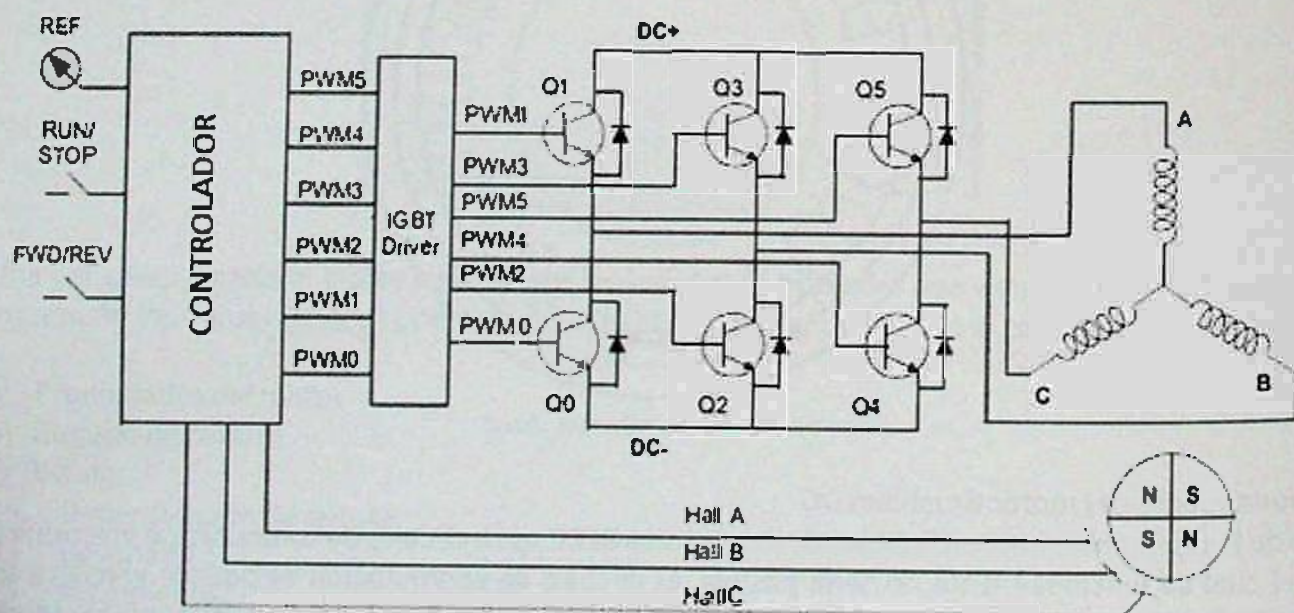
Los motores BLDC se conmutan electrónicamente en función de la posición del rotor. Se tienen varias secuencias de conmutación y cada secuencia tiene uno de los devanados energizado a potencia positiva; es decir, que la corriente entra en el devanado, el segundo devanado es negativo con la corriente que sale de ahí y el tercero está en una condición no energizada. Usando PWM, la tensión promedio suministrada a través de los devanados puede controlarse, controlando así la velocidad.

El torque se produce debido a la interacción entre el campo magnético generado por las bobinas del estator y los imanes permanentes. Idealmente, el torque máximo ocurre cuando estos dos campos están a 90° entre sí y se cae cuando los campos se mueven juntos.

Para mantener el motor en funcionamiento, el campo magnético producido por los devanados debe cambiar de posición, a medida que el rotor se mueve para alcanzar el campo del estator. Lo que se conoce como "Conmutación de seis pasos" define la secuencia de energización de los devanados. Es necesario emplear un dispositivo que realice el control de las señales PWM, este elemento de control puede ser un micro controlador o un microprocesador que tenga salidas PWM. Para este proyecto se seleccionó el micro controlado PIC 16f887.

Además, es necesario tener componentes interruptores para el suministro de corriente de una fuente de potencia diferente a la utilizada por el micro controlador (estos interruptores por lo general son semiconductores tales como Transistores Bipolares, Tiristores, Mosfets de Potencia e IGBTs). A continuación, se muestra en la figura N°9 el circuito de control desarrollado para los motores BLDC, donde Q0 a Q5 son los interruptores de potencia (Microchip Technology Inc, 2003).

Figura N°9. Diagrama de bloques de control



Fuente: Microchip Technology AN885, 2003

RESULTADOS

Tras analizar toda la teoría referente al diseño de este tipo de motor en los elementos principales como el estator, rotor y circuito de conmutación se pudieron obtener los siguientes resultados.

Tabla N°5. Datos del motor BLDC

Parámetros	Valor
Potencia nominal	40[KW]
Velocidad nominal	2600 [RPM]
Longitud del entrehierro	1[mm]
Densidad de flujo del entrehierro	0,65 [T]
Número de vueltas/fase	72
Calibre de alambre	24AWG
Número de hilo	25
Material de laminación	M27_26G
Número de polos magnéticos	24
Número de ranuras	27
Imán permanente	NdFe35
Corriente de alimentación	50,74 [A]
Longitud	100 [mm]
Diámetro interior del rotor	232 [mm]
Diámetro exterior de estator	230 [mm]
Resistencia de fase	0,0541 [ohm]
Inductancia de fase	1,221 [mH]
Factor de bobinado	0,94
Factor de llenado de ranura	0,41
Constante de fuerza contraelectromotriz	2,91 [V/rad/s]
Constante de torque	2,91 [Nm/A]
Rendimiento	95%

Fuente: Elaboración Propia, 2018

Después de realizar la simulación correspondiente para validar los datos obtenidos de forma teórica se obtuvieron los resultados siguientes.

Tabla N°6. Resultados de la simulación aplicando el programa Ansys Maxwell 2018

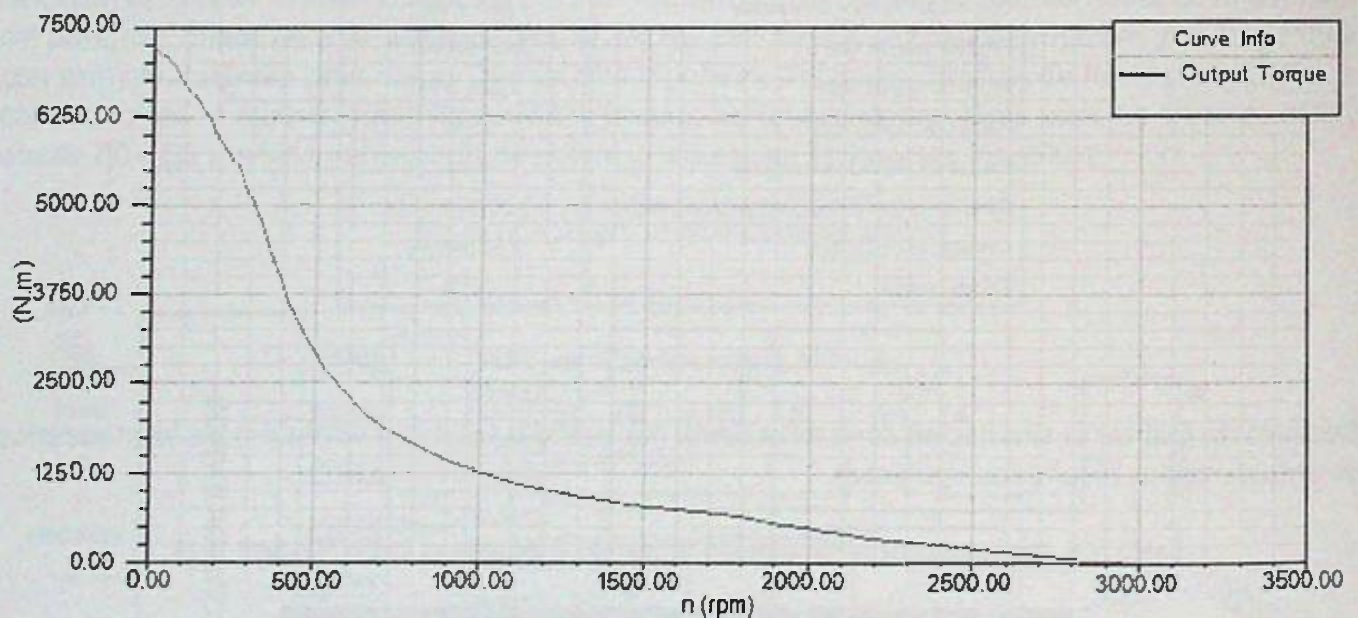
Parámetros	Valor	Unidad
Corriente	53,4426	A
voltaje de alimentación	800	V
Potencia de salida	39985,9	W
Potencia de entrada	42754,1	W
Pérdidas totales	2762,25	W
Eficiencia	93,525	%
Velocidad promedio	2608,83	RPM
Torque promedio	143,363	N.m

Peso total	28,912	Kg
Entrehierro mínimo	1	mm
Factor de llenado de ranura	52,3716	-
Factor de bobinado	0,945214	-
Resistencia de fase a 20°C	0,0669602	Ohm
Constante de CFEM	2,51648	V.s/rad
Constante de torque	2,73767	N.m/A
Torque de Cogging	2,1374	N.m
Densidad de flujo de entrehierro	0,77374	T
Densidad de flujo residual (rotor)	1,23	T
Densidad de flujo de diente de estator	2,34495	T
Densidad de flujo de yugo de estator	0,592679	T
Densidad de flujo de yugo de rotor	1,10633	T

Fuente: Elaboración propia, 2018

Los parámetros fundamentales como el torque desarrollado y la velocidad de giro son los esperados y esto puede ser evidenciado mediante la siguiente gráfica obtenida mediante simulación que nos muestra el comportamiento del motor Brushless DC.

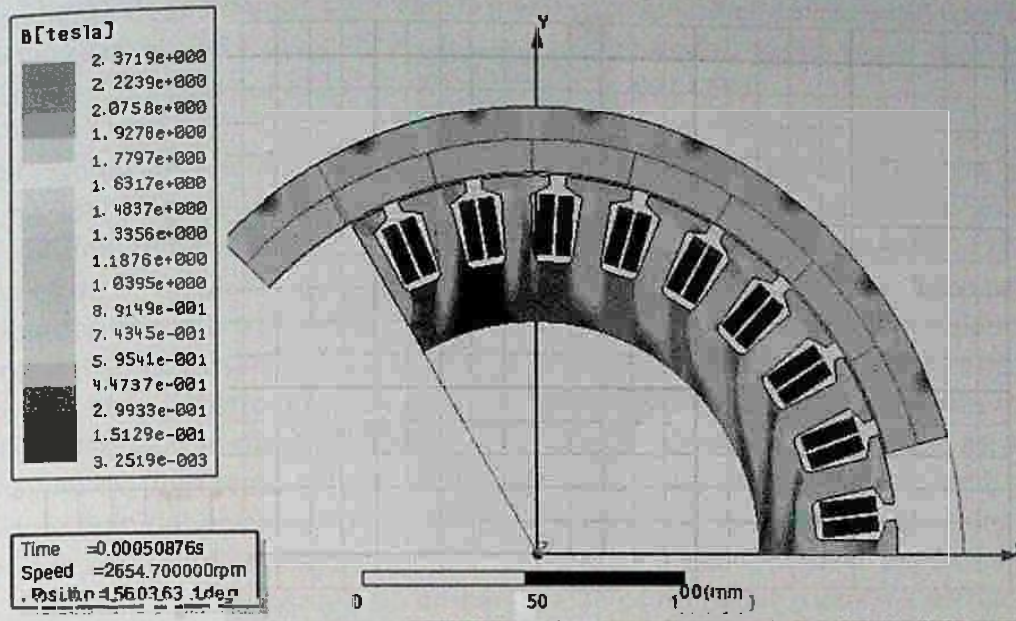
Figura N°10. Torque desarrollado vs. velocidad angular



Fuente: Ansys Maxwell, 2017

También podemos ver el comportamiento magnético del motor Brushless DC. En la gráfica siguiente se observa la densidad de flujo que existe en las partes fundamentales del motor.

Figura N°11. Intensidad de campo magnético

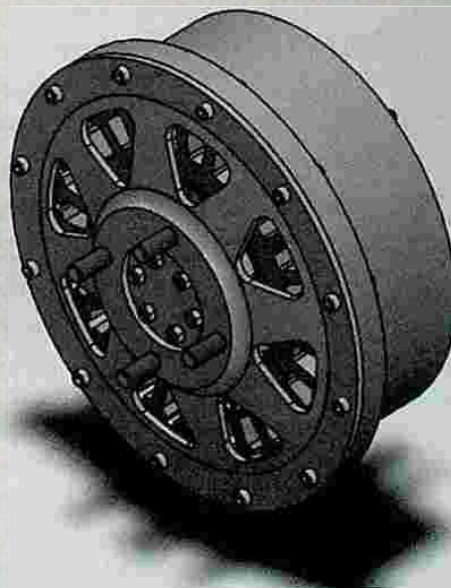


Fuente: Ansys Maxwell, 2017

Representación grafica

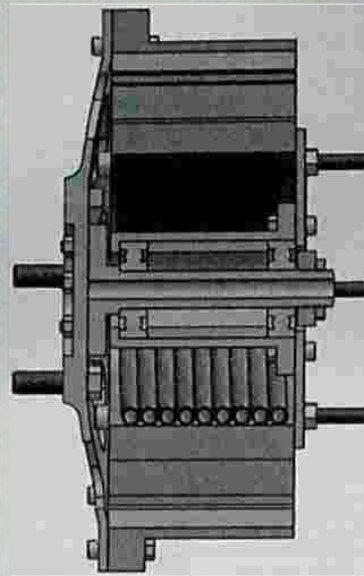
Se han realizado los dimensionamientos correspondientes a los elementos rotóricos como el material y la cantidad de imanes permanentes, además de sus dimensiones y su disposición, todo esto enfocado desde el punto magnético; de igual manera, se ha dimensionado las láminas del estator, considerando también su modelo magnético y la cantidad y dimensiones de ranura; sin embargo, existen elementos adicionales para realizar la construcción de este motor BLCD. Muchos de estos elementos cumplen funciones mecánicas y de soporte al motor, además de algunos para que este puede ser acoplado en una rueda.

Figura N°12. Acabado Final del Motor BLDC



Fuente: Elaboración propia, 2018

Figura N°13. Acabado final-corte del Motor BLDC



Fuente: Elaboración propia, 2018

DISCUSIÓN

Tamaño de la máquina

Uno de los parámetros fundamentales para el diseño del Motor BLDC es el volumen necesario para producir el par; para obtener este parámetro, se recurrió a libros como *Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives* de T. Miller y *Brushless Permanent Magnet Motor Desing* de D. Hanselamn, donde se analiza la constante de torque por unidad de volumen del rotor. Este mismo análisis se puede encontrar en el trabajo de investigación *Sizing of Electrical Machines* de Soong, W., de la misma manera en el proyecto de grado *Diseño de un motor síncrono con imanes de ferritas para motocicleta eléctrica* de H. Aguilar, basándose en estas fuentes bibliográficas y conociendo la longitud del imán permanente, se obtuvo un diámetro de rotor de 0.232 m.

Parámetros eléctricos y magnéticos

Gran parte del presente proyecto fue elaborado a partir de las formulas y afirmaciones del libro *Brushless Permanent Magnet Motor Desing* de D. Hanselamn, en el que se explica bastante sobre este tipo de motor; también se tomó como guía los proyectos de grado *Diseño de un Motor de Flujo Axial de Imanes Permanentes* de M. Gómez y *Pre-diseño de un motor eléctrico para el accionamiento de un automotor* de C. Nieto. Las ecuaciones utilizadas pueden encontrarse en estas tres fuentes bibliográficas, los resultados obtenidos en estos dos últimos trabajos difieren debido a las configuraciones de motor. La justificación principal del trabajo son los resultados obtenidos en la simulación, utilizando el programa Ansys Maxwell con la herramienta RMXprt, donde existe una baja discrepancia entre los valores más relevantes como la corriente nominal I_m , el torque desarrollado T , la resistencia de fase R_p , la constante de torque K_T y fuerza contra electromotriz k_e , la densidad de flujo en el entrehierro B_g y la eficiencia.

CONCLUSIONES

- Considerando la potencia mecánica requerida, se pudo establecer una relación con la potencia eléctrica consumida por el motor, a partir de la cual se pudieron determinar los eléctricos

fundamentales (como ser la selección de el voltaje de alimentación que da inicio al cálculo correspondiente de los demás parámetros eléctricos). El voltaje considerado para la realización del proyecto es de $V=800\text{ V}$, que deberá ser suministrado a partir de una fuente externa, la corriente nominal que es requerida por cada fase de bobinado es de $I=50\text{ A}$.

- Para dimensionar los elementos presentes en el rotor se ha tenido que recurrir a un análisis de tamaño de rotor, donde se pudo obtener los valores aproximados para definir la constante de "torque por unidad de volumen de rotor", a partir de la cual se pudo determinar el diámetro del rotor que es de $D_{ro}=0,232\text{ m}$. Con este valor y mediante la selección de un imán permanente de un distribuidor extranjero se seleccionaron 24 imanes permanentes de dimensiones Ancho= 30 mm, Largo =100mm y Espesor= 10 mm, el material del que está conformado es de una aleación de neodimio, boro y hierro y es conocido como NdB35. Una de sus propiedades magnéticas, la más importante para el dimensionamiento del motor eléctrico sin escobillas, es la remanencia o la densidad de flujo remanente que es de $B_r=1,17\text{ T}$ (es valor es fundamental para hallar la densidad de flujo del entrehierro B_g). El imán permanente seleccionado tiene una calidad N35, lo cual indica que puede trabajar a temperaturas hasta los 80°C (a partir de la cual irá perdiendo su magnetización gradualmente); sin embargo, esto es reversible y una vez enfriado retornará a su estado inicial. Mas si el imán es calentado a la temperatura de curie que es de 310° , perderá su magnetización completamente y de manera irreversible.
- Uno de los dispositivos principales para el funcionamiento de un motor BLDC es el controlador que realiza la conmutación electrónica a una frecuencia determinada por el número de polos magnéticos y la velocidad nominal del motor. Se decidió utilizar el micro controlador PIC 16F887 para este proyecto, que costa de dos salidas PWM; por lo tanto, se decidió utilizar tres de estos dispositivos. La velocidad del motor BLDC está comandada por un potenciómetro, el cual regulará las salidas del PWM. El periodo en el que se debe alimentar cada una de las bobinas es de $P_c=2\text{ ms}$ (este valor es obtenido mediante la frecuencia de conmutación del motor).
- Los sensores de efecto Hall son necesarios para conocer la posición del rotor y poder realizar la secuencia de conmutación del embobinado; se ha seleccionado el dispositivo FS276 que puede trabajar con voltajes desde 2,8v a 20v hasta una temperatura de 150° C .
- Una vez realizada la secuencia de conmutación en el micro controlador es necesario utilizar interruptores de potencia que serán accionados por el micro controlador para dejar dar paso a la fuente de voltaje externo; se ha seleccionado el IGBT MG12100W-XN2MM que trabaja con los valores de voltaje y corriente de $V=1200\text{ V}$ y $I=100\text{ A}$.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Hanselman, D. (2006). Brushless Permanent Magnet Motor Desing. (2da Ed.) Ohio, Estados Unidos: Magna Physics Publishing.
- (2) Libert, F., (SND). Investigation on Pole-Slot Combinations for permanent-Magnet Machines with Concentrated Windings. Recuperado el 6 de noviembre de 2017 de: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.508.1648&rep=rep1&type=pdf>
- (3) Microchip Technology Inc. (2003). Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals. Recuperado el 11 de septiembre de 2017 de: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00885a.pdf>
- (4) Microchip Technology Inc. (2003). Brushless DC Motor Control Using PIC18FXX31 MCUs. Recuperado el 11 de septiembre de: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00899a.pdf>

- (5) Prathamesh, D., (2016). Simulation of a Brushless DC Motor in ANSYS – Maxwell 3D. Recuperado el 4 de septiembre de 2017 de: <https://dspace.cvut.cz>
- (6) Miller, T. (1989). Brushless Permanent- Magnet and Reluctance Motor Drives. Nueva York, Estados Unidos: Oxford University Press
- (7) Jung-Moo Seo (2011). A Study on Brushless DC Motor for High Torque Density. Recuperado el 2 de noviembre de 2017 de: <https://waset.org/publications/15918/a-study-on-brushless-dc-motor-for-high-torque-density>

Fuentes de financiamiento: Esta investigación fue financiada con fondos de los autores.

Declaración de conflicto de intereses: Los autores declaran que no tiene ningún conflicto de interés.

Copyright (c) 2018 José Alejandro Cáceres Corrales.



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumendelicencia](#) - [Textocompletodelalicencia](#)