

# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

Escuela de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología

Unidad Valle de las Palmas



**Diseño y fabricación de motor de corriente directa sin escobillas (BLDC)  
para aplicaciones en vehículos eléctricos ligeros.**

Tesis que presenta para obtener el grado de:

**INGENIERO ELÉCTRICO**

Presenta:

**Gerardo Adrian Bahena Santoyo**

Director de tesis:

**Alejandra Jiménez Vega**

Tijuana B.C.

Septiembre de 2018

## **Resumen.**

Este documento nace de la necesidad de crear tecnología que contribuya con el mejoramiento del medio ambiente, esto se ve reflejado en la fabricación de un motor de corriente directa sin escobillas. El alcance de este documento es ese, se desglosarán los pasos para su fabricación, tales como la configuración eléctrica y magnética que tendrá el motor, todos los aspectos de manufactura e incluso se analizará el diseño de un controlador electrónico para el mismo motor. Posterior a tener el motor y el controlador se mostrarán los resultados de las pruebas que se realizaron para caracterizar el motor.

## **Abstract.**

This document arises from the need to create technology that contributes to the improvement of the environment, this is reflected in the manufacture of a brushless direct current motor. The scope of this document is that, will be broken down the steps for its manufacture, such as the electrical and magnetic configuration that the engine will have, all aspects of manufacturing and even the design of an electronic controller for the same engine will be analyzed. After having the engine and the controller, the results of the tests that were carried out to characterize the engine will be shown.

## **Agradecimientos**

Dedico este logro a Dios que me dio la vida, la sabiduría y la inteligencia para concluir todas las metas que me proponga.

A mis padres Adrian Bahena y Roció Santoyo que siempre me han brindado su amor y apoyo incondicional y les agradezco por siempre preocuparse por mi educación y bienestar.

A la MC. Alejandra Jiménez que me dio su confianza para desarrollar este proyecto, agradezco su apoyo y los conocimientos que me brindo.

A el DR. Allen Castillo, al MC. Alberto Delgado, al MC. José Navarro por brindarme su apoyo y sus conocimientos para poder concluir este proyecto.

A mis hermanos Félix Bahena e Isabel Bahena por brindarme su apoyo y cariño y por compartirme su alegría.

A todos los docentes que me ayudaron con la aportación de sus ideas y conocimientos en la realización de este proyecto.

# Índice

	Pag.
1. Introducción.	1
1.1. Estado del arte.	2
1.2. Justificación.	4
1.3. Metas y objetivos.	5
1.3.1. Meta.	5
1.3.2. Objetivos.	5
1.4. Metodología.	5
1.4.1. Manufactura del motor BLDC.	5
1.4.2. Construcción de controlador.	6
1.4.3. Pruebas al motor.	7
2. Fabricación del motor.	8
2.1. Materiales utilizados	8
2.2. Dimensiones generales.	10
2.3. Rotor.	12
2.3.1. Cavidad para los imanes.	13
2.3.2. Eje del rotor.	13
2.4. Estator.	14
2.4.1. Ranuras del estator.	15
2.5. Bases.	16
2.6. Maquinado.	19
3. Controlador de motor BLDC.	23
3.1. Tipos de control.	24
3.1.1. Control trapezoidal.	25
3.1.2. Control sinusoidal.	26
3.1.3. Control vectorial.	27
3.2. Diseño de circuito.	27
3.2.1. Conmutación electrónica y puentes trifásicos.	29
3.2.2. Protecciones.	31
3.2.3. Sensores de posición.	33
3.2.4. Arduino como microcontrolador.	33
3.2.5. Diagrama de control y código de programación.	34
3.3. Fabricación de controlador.	43
3.3.1. Placa de potencia.	44
3.3.2. Placa de control.	45
3.3.3. Placa de sensores.	46
3.3.4. Componentes adicionales.	46
4. Ensamble.	47
4.1. Ensamble de rotor.	48
4.1.1. Laminas.	48
4.1.2. Eje del rotor.	48
4.1.3. Imanes permanentes.	49

4.2.	Ensamble del estator.	50
4.2.1.	Laminas.	50
4.2.2.	Devanados.	50
4.3.	Ensamble final del motor.	51
4.3.1.	Instalación de estator y rotor.	51
4.3.2.	Instalación de placa de sensores y terminales.	52
4.3.3.	Prototipo terminado.	53
5.	Análisis del motor.	54
5.1.	Pruebas de funcionamiento.	54
5.2.	Software FEMM.	55
5.2.1.	Método de análisis de problemas magnetostáticos por FEMM.	55
5.2.2.	Análisis de elemento finito por FEMM.	57
5.2.3.	Importación de diseño al software.	58
5.3.	Pruebas sin carga.	64
5.4.	Pruebas con carga.	66
6.	Conclusiones.	71
7.	Bibliografía.	72

## Índice de figuras

	Pag.
2.1 Dimensiones de imanes utilizados	10
2.2 Motor BLDC para e-bike 150W	11
2.3 Configuración de polos para fabricación de motor BLDC	12
2.4 Áreas definidas para estator y rotor	12
2.5 a) Cavity para imán; b) Rotor con 8 cavidades	13
2.6 Diseño final de placa para rotor	14
2.7 Dimensiones de la flecha para el eje del motor	14
2.8 a) Brazo del estator; b) Diseño final para estator	15
2.9 Altura del eje del motor	16
2.10 Dimensiones de base para rodamientos	17
2.11 Diseño de placa base	18
2.12 Lamina acondicionada para maquinado	20
2.13 Matriz de láminas para maquinar	21
2.14 Trayectoria de corte	22
2.15 Laminas del estator y rotor	22
2.16 a) Bases para rodamientos b) Base principal	23
3.1 Representación del “Six steps mode”	25
3.2 Señales de conmutación por control trapezoidal	25
3.3 Señales de control por control sinusoidal	27
3.4 Circuito general de control	28
3.5 Principio de conmutación de motor BLDC	29
3.6 Puente inversor trifásico	30
3.7 Protección del circuito de control con opto acopladores	31
3.8 Diodo protector de transistor MOSFET	32
3.9 Polarización de sensor HALL	33
3.10 Microcontrolador Arduino UNO	34

3.11	Diagrama de flujo del funcionamiento del controlador	35
3.12	Código para microcontrolador Arduino UNO	36
3.13	Controlador de motor BLDC	43
3.14	Componentes de placa de potencia	44
3.15	a) Diseño pcb para la placa de potencia; b) placa de potencia impresa y con refuerzos en conductores de alta corriente	44
3.16	Componentes de placa de control	45
3.17	Placa de control con microcontrolador Arduino UNO	45
3.18	a) Diseño de para placa de control; b) Placa de control impresa	46
3.19	Placa para montar sensores HALL	46
4.1	a) Proceso de barnizado de láminas; b) Laminas listas para ensamblar	47
4.2	Láminas de rotor apiladas y comprimidas	48
4.3	Proceso de inserción de flecha en rotor	48
4.4	Montaje de imanes permanentes	49
4.5	Detallado final de rotor	49
4.6	Láminas del estator apiladas	50
4.7	a) Fabricación de bobinas; b) Instalación de bobinas en estator	51
4.8	a) Modelo en computadora; b) Ensamble físico	52
4.9	a) Calibración de sensores; b) Señal de salida sensor HALL contra fases	52
4.10	Prototipo final de motor	53
4.11	a) Entrehierro; b) Imperfecciones en el núcleo del estator	53
5.1	Modelado de motor BLDC en software FEMM	55
5.2	División de rotor de imanes permanentes para análisis de elementos finitos	57
5.3	Geometría del motor en formato .dxf	58
5.4	Generando un nuevo problema	58
5.5	Definiendo el problema	59
5.6	Definiendo límites del análisis	59

5.7	Selección de materiales a utilizar	60
5.8	Definiendo propiedades de las geometrías	61
5.9	Definiendo dirección de devanados del estator	62
5.10	Definiendo propiedades de los imanes permanentes en el rotor	63
5.11	Definiendo al rotor como un grupo	63
5.12	Comportamiento sin carga	64
5.13	Análisis de torque sin carga en un instante FEMM	65
5.14	Comportamiento de torque sin carga	65
5.15	Freno electromagnético DL 10300A	66
5.16	Elemento de nivelación para DL 10300A	67
5.17	Comportamiento par vs velocidad	68
5.18	Curva de eficiencia del motor	69
5.19	Análisis de torque con carga por FEMM	69
5.20	Par motor con respecto a ángulo y valor eficaz	70

## Índice de tablas

	Pag.	
5.1	Resultados de primera prueba del motor BLDC sin carga	54
5.2	Resultados de segunda prueba del motor BLDC sin carga	54
5.3	Resultados de prueba con carga	68





# 1. Introducción

La fabricación de un motor para un vehículo eléctrico ligero comienza con la definición del tipo de motor que se utilizará para la aplicación. En este trabajo, se analizaron las opciones de motores de inducción, motores síncronos de imanes permanentes, motores de reluctancia variable y motores de corriente directa sin escobillas BLDC. Sin embargo, los motores de inducción y síncronos de imanes permanentes resultaron no factibles y, al comparar los motores de reluctancia variable y los BLDC, se descubrió que éstos últimos tienen densidad de potencia mayor, por lo que se determinó fabricar un motor BLDC. Finalmente, se optó por un motor de rotor interno debido a que sus características de enfriamiento son superiores a los de rotor externo.

Después de definir las características del rotor y el estator del motor, es necesario realizar el diseño de las piezas que formaran al rotor, la flecha, el estator, así como, las bases para los rodamientos y la base del motor. Con base al diseño, se llevará a cabo el proceso de maquinado de cada una de las piezas.

Una vez que el motor se encuentra ensamblado, es necesario diseñar el sistema de control para su conmutación. El controlador propuesto en este trabajo se basa en un puente inversor trifásico controlado por un microcontrolador arduino y en su diseño incluirá las protecciones necesarias para el buen funcionamiento del motor y el mismo controlador.

Finalmente, se realizan las pruebas para verificar el comportamiento del motor. Las pruebas llevadas a cabo son con y sin carga. Los resultados obtenidos se verifican con un software de análisis por elementos finitos.

## 1.1. Estado del arte

El desarrollo de los vehículos eléctricos a lo largo del último siglo ha sido una serie de logros y fracasos. El vehículo eléctrico se ha visto apartado del mercado durante un largo tiempo, pero ha resurgido gracias a que posee cualidades como un sistema de propulsión simple, funcionamiento silencioso y una gran robustez.

Hoy en día se está presenciando el resurgimiento más grande del vehículo eléctrico, el cual tiene como respaldo la preocupación por el calentamiento global y el desarrollo de nuevas tecnologías, lo que incrementan la confianza en este tipo de vehículos [1].

El vehículo eléctrico tiene más de 100 años desarrollándose. A finales del siglo XIX, los primeros vehículos motorizados utilizaban motores eléctricos, se utilizó esta forma de propulsión como alternativa a los sistemas de tracción animal. En 1877, Nikolaus August Otto inventó el motor de combustión de 4 tiempos, mientras que en 1859, Gaston Planté diseñó las primeras baterías de plomo y ácido, que no fueron utilizadas hasta 1881 para aplicaciones en vehículos eléctricos, en ese año el francés Charles Jeantaud construyó el Tilburi, que probablemente sea el primer vehículo eléctrico alimentado por baterías, sin embargo al ser el primero presentó grandes fallas, el Tilburi fue consumido por las llamas al recorrer sus primeros 100 metros [1].

Tuvieron que pasar más de 10 años para poder ver los primeros vehículos eléctricos en las calles, su principal debut fue en flotillas de taxis en Inglaterra conocidos como Taxi-Cab, para posteriormente extenderse a Francia y Estado Unidos.

Aunque el vehículo eléctrico presentó un gran inicio, no tardó en enfrentarse a las limitaciones tecnológicas de su época, como lo era la poca autonomía y tiempos de carga demasiado largos, limitaciones que el motor de combustión interna lograba superar, esto acabó en ese tiempo el desarrollo del vehículo eléctrico.

Durante la Segunda Guerra Mundial se presentó una escasez de petróleo en Francia y una vez más se pensó en los motores eléctricos como sistemas de propulsión para los vehículos. Varios fabricantes estuvieron experimentando con la tecnología y se crearon varios modelos. Renault sacó el Renault Juvaquatre, Peugeot sacó el Peugeot 202 y Mildé-

Krieger saco el Licorne, este último fue el más próspero fabricando alrededor de 200 unidades con una autonomía de 100km [1].

En la última década los vehículos eléctricos están comenzando a ganar peso en la industria del automóvil, debido a sus prestaciones superiores frente a los vehículos de combustión interna y el desarrollo de nuevas tecnologías. Aunque los vehículos eléctricos aún abarcan un sector muy grande en el mercado muchas compañías trabajan en el desarrollo de sus tecnologías, como lo son, Toyota con el Toyota Prius, que cuenta con un motor de corriente continua de imán permanente, Tesla con el Tesla Roadster que cuenta con un motor de inducción de 3 fases y 4 polos.

La creciente preocupación por la salud del medio ambiente alrededor del mundo ha impulsado el desarrollo de nuevas tecnologías que disminuyan el impacto ambiental que generamos. Los vehículos eléctricos son una de estas tecnologías. En los últimos años grandes empresas se han sumado a esta preocupación ofreciendo al mercado diferentes vehículos con propulsión eléctrica, como lo son nissan leaf en 2010, Chevrolet volt en 2010, entre muchos otros modelos [2].

Hoy en día los motores eléctricos utilizados en los vehículos eléctricos son muy variados, cada fabricante determina cual es el motor que más le conviene dependiendo de las prestaciones que quiere ofrecer en el mercado, hay algunos como los modelos de Tesla Motors o el Mercedes-Benz B 250 e que cuentan con motores de inducción asíncronos y otros como el nissan leaf y el Hyundai IONIQ ELECTRIC que utilizan motores síncronos de imanes permanentes, otras tecnologías también utilizadas en vehículos eléctricos son los motores de reluctancia variable y los motores de corriente directa sin escobillas BLDC.

Los motores BLDC tienen una composición similar a los motores síncronos de imanes permanentes ya que cuentan con rotores magnéticos similares, pero a diferencia de los motores síncronos de imanes permanentes, los motores BLDC no son fabricados en grandes dimensiones. Estos motores son utilizados más ampliamente en sistemas híbridos y vehículos eléctricos ligeros. Esto es debido a que estos motores presentan una mayor densidad de potencia y un par motor mayor en comparación con otros tipos de motores del mismo tamaño.

Al igual que los vehículos eléctricos, los vehículos eléctricos ligeros también han tenido un gran desarrollo en los últimos años igualmente debido a la preocupación por el medio ambiente, pero además de esta preocupación otro factor que ha impulsado su desarrollo es la falta de opciones de movilidad personal. Los vehículos eléctricos ligeros ofrecen una mejor alternativa a la movilidad personal y en contraste al resto de los vehículos estos no ocupan tanto espacio contribuyendo de menor manera al congestionamiento de las vialidades y ofreciendo una mayor flexibilidad en recorridos cortos, además de que los vehículos eléctricos ligeros son más accesibles que uno de tamaño completo y los costos de mantenimiento son menores [3].

## **1.2. Justificación.**

Un motor que será utilizado en aplicaciones de vehículos eléctricos ligeros requiere tener ciertas características que le permitan cumplir con las necesidades de esta aplicación, tiene que poder responder ante cualquier cambio en las condiciones de uso como podría ser una pendiente, o un tramo largo, así como responder de manera controlada a los cambios de velocidad que se le exijan es por esto que el motor eléctrico utilizado tiene que cumplir con las siguientes características.

- Alto par y densidad de potencia.
- Alto par de arranque para bajas velocidades.
- Amplio rango de velocidad de entre 3 a 4 veces la velocidad base.
- Alta eficiencia en toda la gama de velocidades.
- Capacidad de sobrecarga intermitente de alrededor el doble de su capacidad nominal.
- Alta robustez para soportar las condiciones ambientales.

Motores como de inducción o síncronos de imanes permanentes son algunas opciones, pero en dimensiones pequeñas no presentan una gran densidad de potencia porque no son compatibles con esta aplicación, los motores de reluctancia conmutada son muy buenos y presentan una buena densidad de potencia, pero los motores BLDC al tener imanes permanentes en su rotor superan a los motores de reluctancia conmutada. Es por esto que se trabajara en el desarrollo de un motor BLDC el cual se adapta muy bien a la aplicación.

### **1.3. Metas y objetivos**

#### **1.3.1. Meta**

La meta de este trabajo es fabricar un motor de corriente directa sin escobillas (BLDC) de 150W a 24v tomando como base un motor BLDC de características similares utilizado en vehículos eléctricos ligeros, como caso particular en e-bikes.

#### **1.3.2. Objetivos**

- *Manufactura del motor BLDC:*

Realizar el maquinado de los núcleos del rotor y del estator del motor utilizando distintas técnicas para su fabricación, así como realizar el devanado de los polos en el estator.

- *Diseño del control eléctrico:*

Diseñar un sistema de control basado en un puente trifásico utilizado para alimentar el motor, utilizar un microcontrolador tipo arduino para controlar la alimentación del motor.

- *Caracterización del motor:*

Realizar pruebas al motor para comprobar los valores reales del motor y generar sus curvas características.

### **1.4. Metodología**

#### **1.4.1. Manufactura del motor BLDC**

- *Diseño de láminas del rotor y estator:*

Considerando las dimensiones generales del motor base, los factores de diseño de motor BLDC y posibilidades de manufactura, se realizará la selección del número de polos en el rotor y estator y se dimensionarán los brazos en el estator y las cavidades para los imanes en el rotor.

- *Maquinado de núcleos de rotor y estator.*

Con el modelo de las láminas para el rotor y estator, se maquinarán cada una de las láminas del núcleo, este proceso se realizará en una maquina fresadora CNC tipo prototrak modelo VIWA VF4BM400 posterior a eso una capa de barniz dieléctrico será aplicado a las láminas para aislarlas unas de otras, posterior a eso se apilarán para conseguir los núcleos del motor.

- *Maquinado de piezas varias.*

El cuerpo del motor será conformado por una base general y las cavidades de los rodamientos, el maquinado de estos elementos se llevará a cabo de igual manera en la maquina VIWA VF4BM400 con herramientas de corte de dos filos.

- *Ensamble del motor.*

Una vez que se tenga el núcleo del rotor se colocarán los imanes permanentes y se realizara acondicionamiento. En el estator se colocarán los devanados y se ensamblarán el resto de las piezas en la base del motor.

#### **1.4.2. Construcción de controlador**

- *Análisis de puente trifásico.*

Se realizará un análisis del funcionamiento de un puente trifásico, los componentes que necesita para su protección y la configuración de los transistores MOSFET.

- *Diseño y construcción de circuito de control.*

Se diseñará un circuito controlador que se adapte a un microcontrolador arduino, este estará fabricado de acuerdo con las características de esta aplicación. Para controlar el motor se generará un código en lenguaje C para el microcontrolador el cual mandará la señal para realizar la conmutación para el motor.

Posterior a que se tenga el diseño se fabricaran las placas para el sistema de control y la etapa de potencia en donde se ubican los transistores MOSFET.

Se construirá un circuito que se adapte al microcontrolador arduino con la configuración de salidas de acuerdo con la aplicación deseada. Además, se generará un código de control en lenguaje C diseñado para la conmutación del motor y se colocaran los sensores de posición en el motor.

- *Pruebas de control.*

Realizar pruebas al control, para determinar que se cumplan las características esperadas y en caso de la existencia de problemas en la alimentación del motor, éstas sean resueltas previo a la etapa de caracterización.

#### **1.4.3. Pruebas al motor**

- *Pruebas de circuito abierto.*

Las primeras pruebas que se realizarán al motor serán sin carga, en las que se medirán valores como caída de voltaje y corriente consumida, así como el rango de velocidades en el que trabaja.

- *Curvas par-velocidad.*

Para determinar la potencia de salida se utilizará un freno electromagnético para determinar la curva par velocidad del motor y en función de los resultados determinar su eficiencia.



## 2. Fabricación del motor

El torque producido por un motor BLDC es uno de los parámetros más importantes que se tienen que determinar a la hora de un diseño. Determinar el torque que se producirá es de suma importancia ya que el torque es el factor que hace que todos los motores funcionen. El torque será determinado por la potencia del motor y el tipo de aplicación al que será sometido.

Como se ha mencionado, los motores eléctricos son máquinas que utilizan energía eléctrica en su entrada y producen energía mecánica en su salida. Para comenzar con el diseño del motor es necesario determinar las características mecánicas que se esperan a la salida.

En este trabajo se desea que el prototipo se aplique en vehículos eléctricos ligeros tal como una bicicleta, una silla de ruedas o incluso una motocicleta. Considerando lo anterior, el prototipo de motor BLDC tendrá parámetros mecánicos de 150 watts a una velocidad de 1500 rpm y un par-motor de 0.9548 N.m.

### 2.1. Materiales utilizados

Acero eléctrico.

Los aceros eléctricos son los materiales ferromagnéticos mayormente utilizados en el diseño de máquinas eléctricas, debido a la gran facilidad para ser magnetizados en varias direcciones. Estos materiales se encuentran en el núcleo de la mayoría de los transformadores y máquinas rotativas, utilizado en forma de láminas muy delgadas para transportar el flujo magnético por todo el cuerpo de la máquina.

Este material dependiendo de su estructura se clasifica en dos familias, por un lado, están los aceros de grano orientado, que cuentan con una estructura cristalina que está orientada en la dirección del laminado. Este tipo de acero es fabricado para aplicaciones en las que las pérdidas se necesitan reducir al mínimo como lo son transformadores de salida, transformadores de distribución pública y transformadores de potencia. Por otro lado, están los aceros de grano no orientado, estos aceros cuentan con propiedades isotrópicas y sus cristales no tienen una orientación definida, este tipo de aceros es utilizado para la construcción

de máquinas rotativas como motores y generadores y en transformadores de baja potencia [4].

El acero al silicio M-27 es un acero eléctrico de grano no orientado con alrededor de 0.3 mm de grosor y un factor de apilamiento de 0.9. Por lo general los aceros eléctricos no orientados tienen un nivel de silicio de entre 2 a 3.5% y como ya se mencionó cuentan con propiedades isotrópicas, esto se presenta en todas las direcciones lo cual reduce el costo de fabricación y se vuelven mejores para aplicaciones en donde la dirección del flujo magnético no es rectilínea, lo que ocurre normalmente en geometrías cilíndricas.

El acero M-27 es utilizado normalmente para máquinas rotativas de tamaño mediano y pequeños transformadores [5].

Imanes permanentes.

La industria de los imanes permanentes ha presentado grandes avances en cuestión de la densidad energética que tienen los nuevos imanes permanentes en el mercado, los imanes con aleación neodimio-hierro-bromo hasta el momento son los que mejores propiedades presentan. Estos imanes al tener alta remanencia y coercitividad permiten que los nuevos motores eléctricos tengan reducciones significativas en sus tamaños ya que aumentan su densidad energética, pero esto no siempre es lo que hay que tomar en cuenta a la hora de seleccionar un imán permanente para un motor y que aunque los imanes NdFeB tienen excelentes propiedades su precio es muy elevado, por otra parte los imanes cerámicos cuentan con diferentes grados y son considerablemente más económicos que los NdFeB [6].

Los imanes empleados en la fabricación del prototipo son imanes de ferrita Y-25 que es un imán grado 5 y es capaz de desarrollar una densidad de flujo magnético B de entre 3600 -4000 Gauss.

Se utilizarán 8 imanes curvos como el mostrado en la figura 2.1, 4 de ellos con polaridad norte y los otros cuatro con polaridad sur.

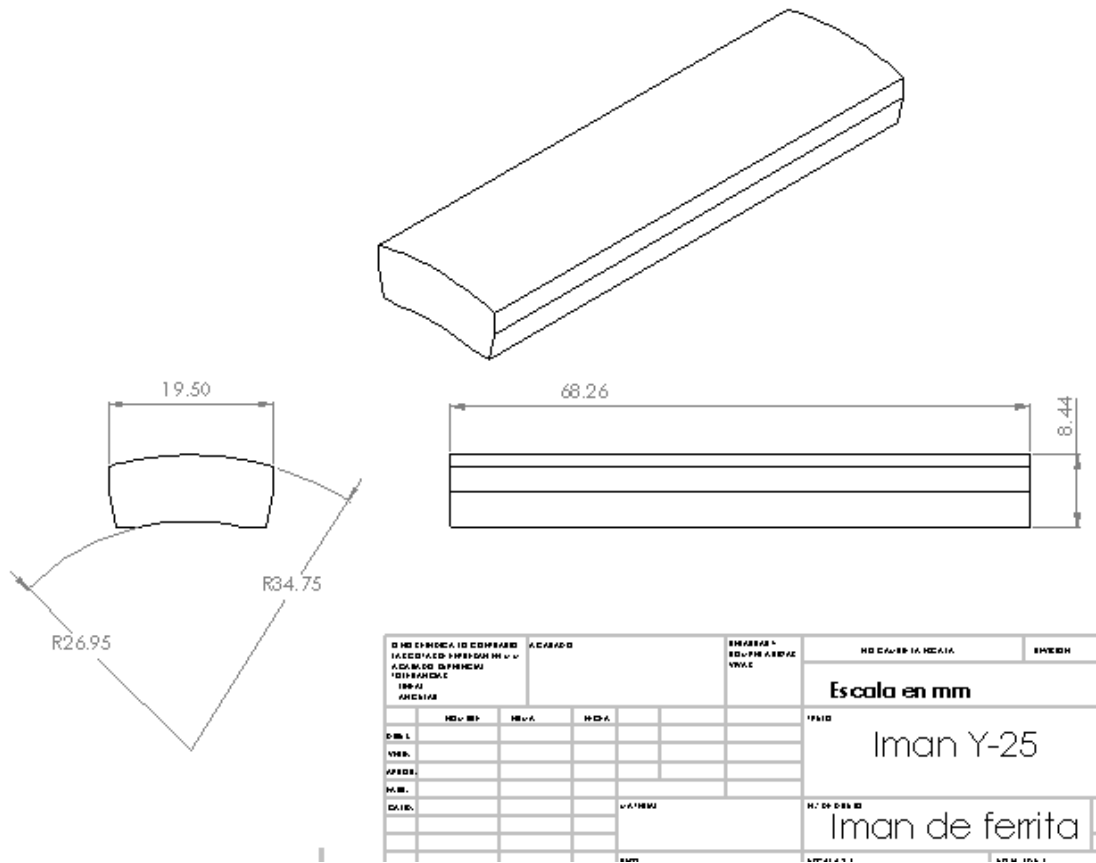
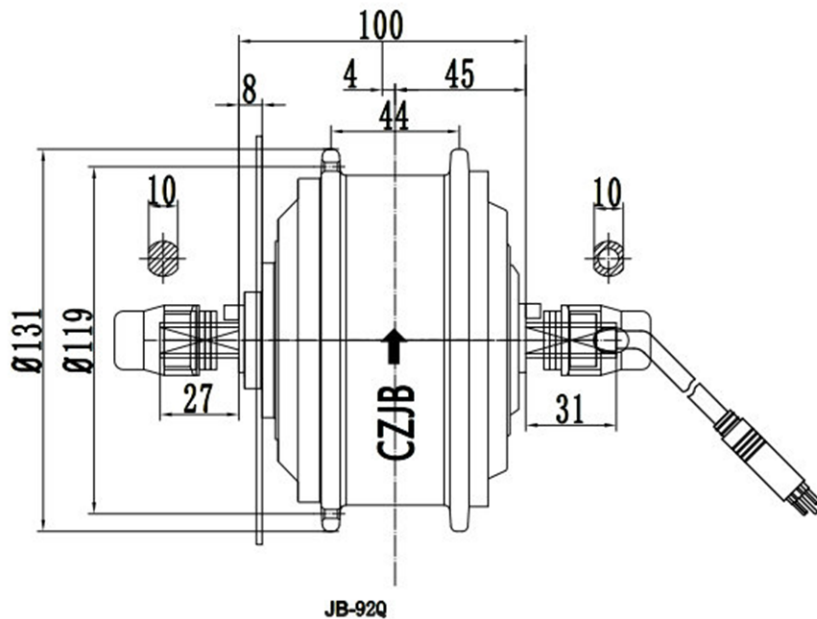


Figura 2.1. Dimensiones de imanes utilizados.

## 2.2. Dimensiones generales

Para determinar las dimensiones generales del motor se considerará un motor BLDC comercial utilizado en bicicletas eléctricas con características similares a las que se esperan. Las dimensiones definidas son las mostradas en la figura 2.2. para el estator son 120mm de diámetro exterior y 68 mm de grosor del núcleo.

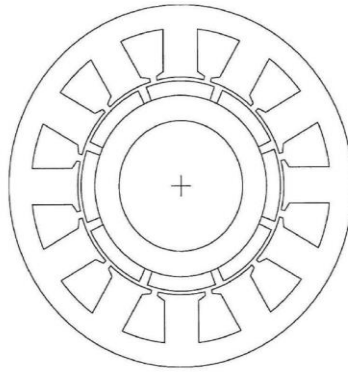
En el caso del rotor, existen diferentes configuraciones en motores tipo BLDC, puede ser con rotor interior o rotor exterior. En este trabajo se requiere obtener un motor con revoluciones relativamente altas, por lo que el motor de rotor interno representa la mejor opción, además de que se tendrá una refrigeración más eficiente.



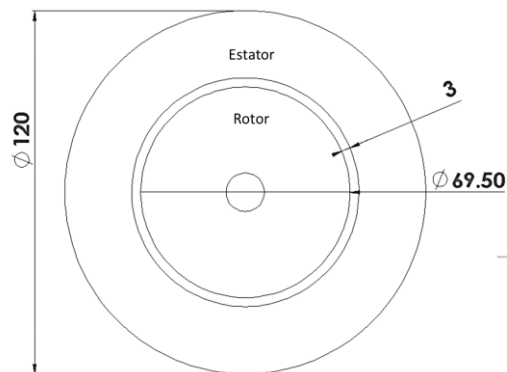
*Figura 2.2. Motor BLDC para e-bike 150W.*

Existen diferentes configuraciones entre polos magnéticos en el rotor y polos en el estator, se tienen relaciones de 2 polos magnéticos por cada 3 polos en el estator, también hay otras configuraciones que no cumple con esta relación colocando una alta cantidad de polos en el estator y pocos polos magnéticos en el rotor. La diferencia entre utilizar una configuración con 2 polos magnéticos por cada 3 polos en el estator es que tienen una generación de distorsión armónica menor a cualquier otra configuración, además que la distorsión generada es la 5ta armónica y las demás configuraciones generan 3ra armónica [7].

Para determinar la cantidad de polos en el estator se tiene que tomar en cuenta que en ellos se repartirá la fuerza que se necesita generar, también es necesario prever las posibilidades de manufactura disponibles. En este trabajo, para simplificar la manufactura del motor se optó por un diseño con 12 polos en el estator y 8 polos en el rotor mostrado en la figura 2.3.



*Figura 2.3. Configuración de polos para fabricación de motor BLDC.*

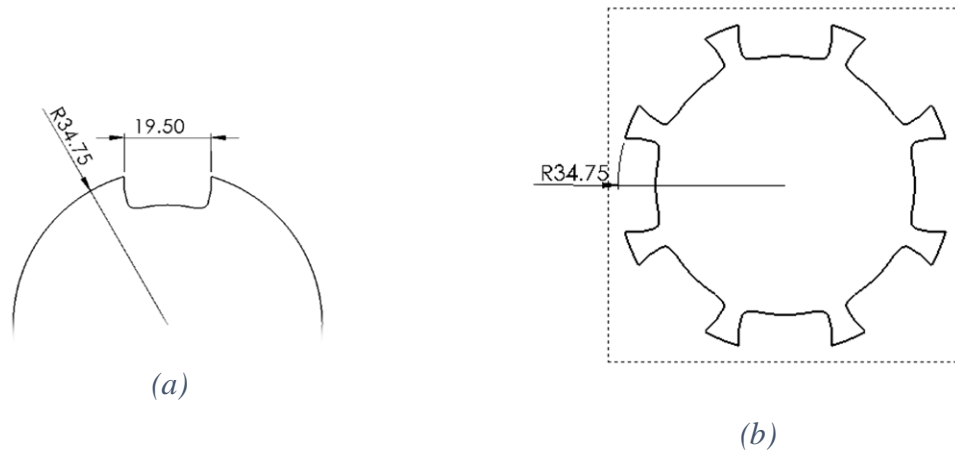


*Figura 2.4. Áreas definidas para estator y rotor.*

Una vez que se tienen las dimensiones del estator y se definió el número de polos, se determinan las dimensiones del rotor que serán las mostradas en la figura 2.4 y se plantea la distribución de los polos en ambas partes.

### **2.3. Rotor**

Para fabricar el rotor, primero se tiene que realizar el diseño de las cavidades de los imanes permanentes, ver figura 2.5 *a*. Una vez definidas, es necesario determinar las dimensiones para el barreno del eje del motor, así como también otros aspectos en el mismo eje.



*Figura 2.5. a) Cavidad para imán; b) Rotor con 8 cavidades.*

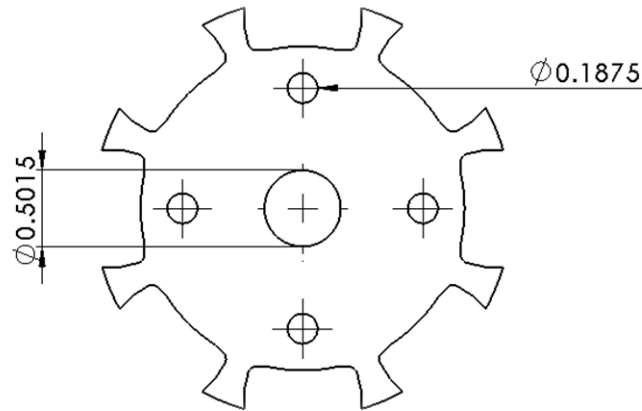
### 2.3.1. Cavidad para los imanes

Para el diseño de las cavidades de los imanes, se comienza con un solo imán, considerando el diámetro definido para el rotor en la parte superior se define una cavidad para las dimensiones del imán. Posterior a eso se realiza un matriz circular para colocar las 8 cavidades en la circunferencia del rotor como se muestra en la figura 2.5 b.

### 2.3.2. Eje del rotor

Para continuar con el diseño del rotor es necesario insertar una flecha en el centro del rotor para poder transferir la potencia, para esto se utilizará una flecha de  $\frac{1}{2}$  pulgada.

Para insertar la flecha en el rotor es necesario realizar un barreno de  $\frac{1}{2}$  pulgada más 1.5 milésimas de pulgada para que la flecha pueda entrar en el barreno, es preferible que este barreno se realice cuando ya este todo el bloque de láminas de acero, ya que tiene que quedar muy preciso. Otro aspecto que considerar tanto en el rotor como en el estator es la forma en la que se compactaran las láminas. En este caso se optó por utilizar placas con la misma geometría, pero de un acero no eléctrico de  $\frac{1}{8}$  de pulgada, para poder compactar las láminas es necesario realizar unos barrenos en el rotor para poder pasar tornillos y poder compactar las láminas, el diseño final de las laminas del rotor es mostrado en la figura 2.6.



*Figura 2.6. Diseño final de placa para rotor.*



*Figura 2.7. Dimensiones de la flecha para el eje del rotor.*

Para el eje del motor es necesario realizar algunas modificaciones en la flecha de  $\frac{1}{2}$  pulgada. Los puntos que se tienen que considerar son las ranuras para los retenes que limitaran el movimiento de los rodamientos, otro punto importante es el agarre entre la flecha y el rotor. Para que no exista deslizamiento entre estas dos partes es necesario que se realice un moleteado a la flecha en el área del rotor. Al realizar el moleteado el material de la flecha se expande en algunos puntos mejorando el agarre entre los dos elementos. El diseño final del eje se muestra en la figura 2.7.

## 2.4. Estator

En conjunto con el rotor, el estator forma parte de las dos piezas fundamentales para el funcionamiento del motor. El estator de un motor BLDC está compuesto por distintos brazos que son los que sostienen los devanados del motor, en motores trifásicos estos brazos

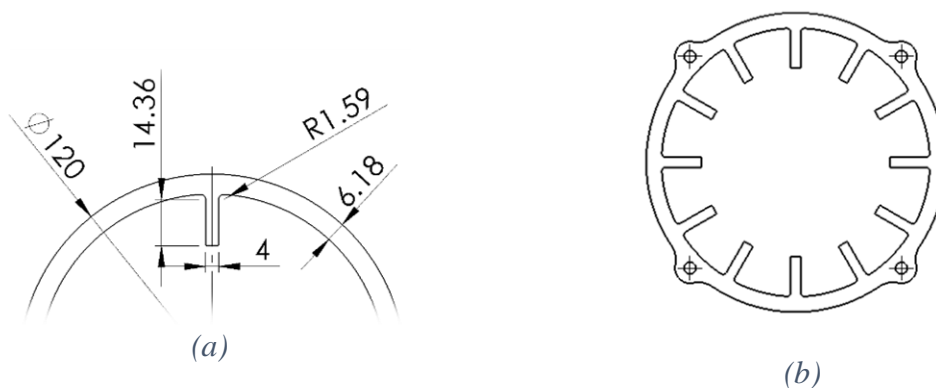
se encuentran en múltiplos de 3. Como ya se había definido, el estator que se fabricara tiene un diámetro exterior de 120mm y un diámetro interior de 75.5mm. también se definió que se trabajará con un estator con 12 brazos, conforme con los polos del rotor.

#### 2.4.1. Ranuras del estator

En la mayoría de los motores convencionales las ranuras del estator son utilizadas para alojar un devanado de una fase, en cambio en un motor BLDC los devanados de las fases se encuentran alrededor de los brazos del estator.

Para diseñar estas ranuras o brazos del estator hay que tomar en cuenta la distancia entre el diámetro exterior y el diámetro interior, esta es el área en la que se trabajara para definir las dimensiones. Hay que tener en cuenta que considerando la dirección de los flujos en el motor el cuerpo del estator debe tener el doble de grosor que el de los brazos.

Al igual que en el rotor, es necesario realizar primero un solo brazo, posterior a eso, se realiza un matriz circular de 12 elementos alrededor de todo el estator figura 2.8 a, b, también al igual que en el rotor para poder compactar las láminas se fabricará una geometría igual pare en un acero de 1/8 y para compactarla se utilizarán 4 barrenos distribuidos uniformemente en el estator.



**Figura 2.8.** a) Brazo de estator; b) Diseño final para estator.



## 2.5. Bases

Con el diseño del estator y del rotor ya se tienen los principales elementos en un motor eléctrico, pero para que éstos puedan funcionar es necesario colocarlos en una estructura que permita su fijación y alineamiento, en esta estructura también se necesitan montar los rodamientos que disminuirán la fricción de rotación del rotor, mejorando la transferencia de potencia a través del eje. En un motor industrial esta estructura es la carcasa, la carcasa de un motor está compuesta por 3 componentes, el cuerpo de la carcasa que es donde se aloja el estator y las dos tapas en donde se encuentran alojados los rodamientos, estos tres elementos están diseñados para alinear al rotor y al estator. También hay otras formas de realizar la alineación, para prototipos de motores es posible fabricar bases para alojar los rodamientos con las medidas necesarias para que el rotor quede alineado con el estator.

Para comenzar con las bases es necesario conocer los materiales que se utilizarán, para fabricar las bases del motor es necesario seleccionar un material que sea fácil de maquinar, como las bases no son sometidas a grandes fuerzas, es posible utilizar placas de aluminio de  $\frac{1}{2}$  pulgada para trabajar con las bases.

Para comenzar con el diseño de las bases para los rodamientos es necesario tener la medida de la altura del eje de la máquina, conociendo este valor es posible comenzar con el diseño. Ver figura 2.9.

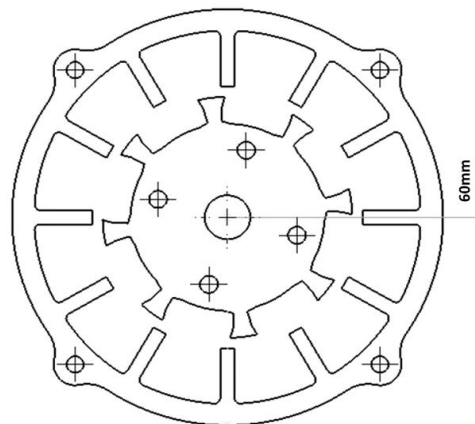
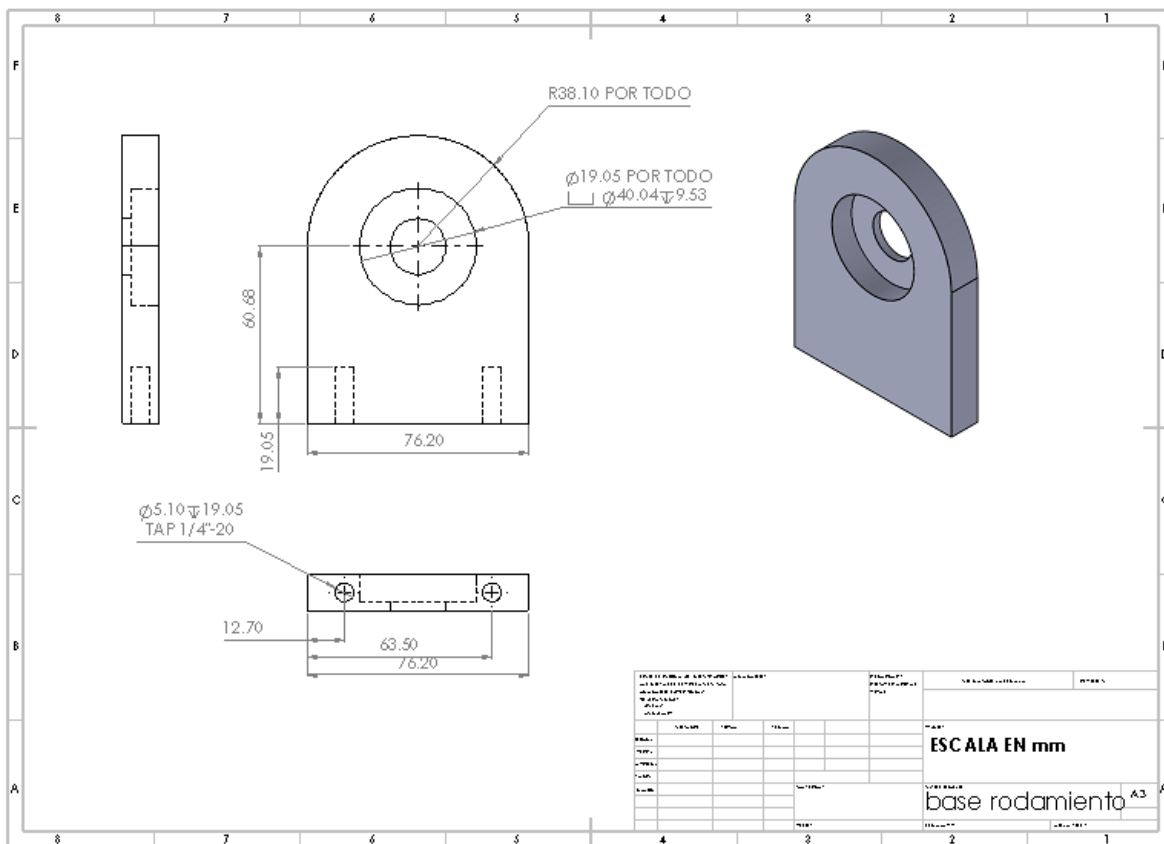


Figura 2.9. Altura del eje del motor.

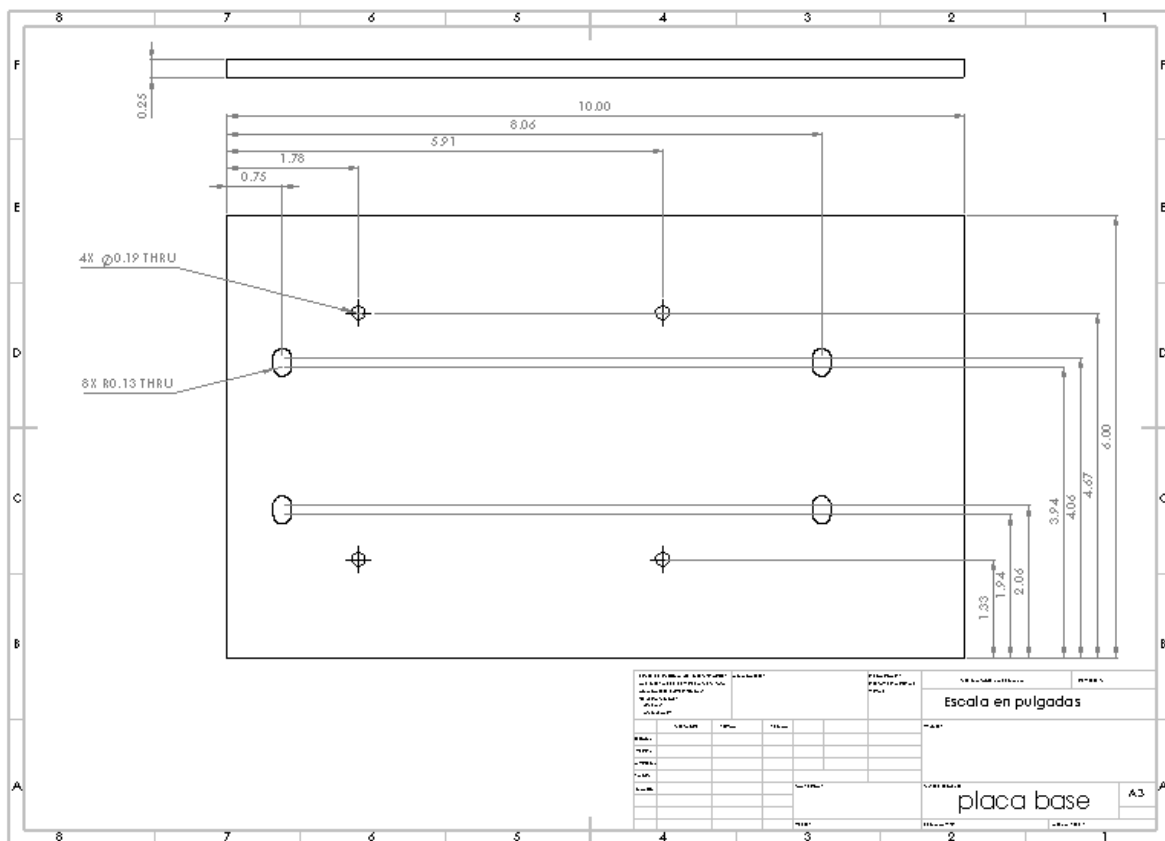
Se coloca el centro del rodamiento en la altura del eje, después de eso es necesario darle soporte, se crea una estructura rectangular para alojar el rodamiento, en la cavidad del rodamiento se aumenta 0.04mm al diámetro (40mm) para que el rodamiento se aloje correctamente sin afectar sus características y sin que presente movimiento en la cavidad, la profundidad de esta cavidad será de 9.53mm. como la cavidad no pasa toda la placa para evitar que el rodamiento se salga de la cavidad, es necesario realizar un barreno pasado por donde saldrá el eje del motor este rodamiento debe de ser de un mayor diámetro que el del eje para evitar rozamientos entre esas dos piezas, además de permitir que pase el eje del motor, este barreno tiene la función de facilitar al extracción del rodamiento. También es necesario fijar esta base a una base adicional donde irá montado todo el motor, para esto es necesario hacer barrenos en la parte inferior de esta base, estos barrenos se realizarán con una broca #7 con 5.1054 mm de diámetro, esto para que posteriormente se utilice un machuelo de  $(\frac{1}{4} - 20)$  para fijar la base utilizando tornillos.



*Figura 2.10. Diseño de base para rodamientos.*

Finalmente, todo el motor y las bases de los rodamientos serán montados en una placa cuyas dimensiones son 6 x 10 pulgadas con un espesor de  $\frac{1}{2}$  pulgada. Para realizar los barrenos en la placa se deben considerar las dimensiones de la flecha del rotor y también se considerará que los rodamientos salen 2.47 mm de la superficie de las bases. Otro aspecto que considerar es que el estator del motor será fijado con escuadras de 1 pulgada.

Para la base de los rodamientos se consideró realizar una ranura con finales circulares a una distancia de 3.18 mm entre centros, esto para que el rotor se pueda alinear con el estator.



*Figura 2.11. Diseño de placa base.*

## 2.6. Maquinado

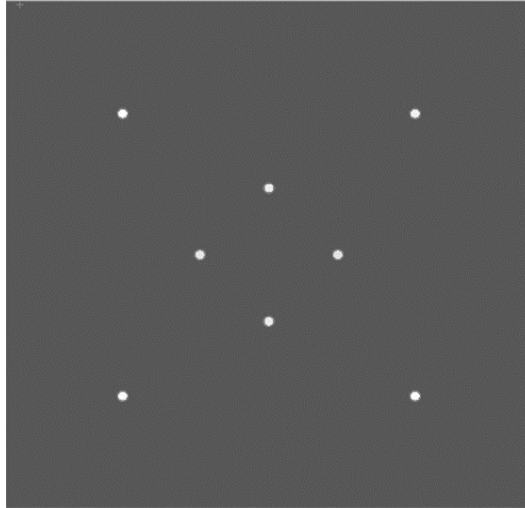
Comercialmente existen dos maneras de fabricar los núcleos de los estatores y rotores en los motores, corte por estampado y corte por láser, dependiendo de la aplicación se utiliza cada uno.

Para grandes producciones de motores de tamaño chico o mediano es factible utilizar el corte por estampado, que consiste en troqueles que cortan las láminas para el estator y el rotor. La mayoría de los fabricantes de motores ha adoptado esta técnica ya que presenta grandes ventajas en cuanto eficiencia y bajo costo, además que la tecnología ha desarrollado máquinas de estampado de alta velocidad que aumentan la producción de motores. Estas máquinas de estampado funcionan introduciendo las láminas de acero y cortándolas alrededor de 250 golpes por minuto con una fuerza de hasta 1250 toneladas.

Cuando es necesario fabricar motores de gran tamaño que por sus dimensiones y su producción no resulta factible fabricar un troquel para su estampado, se utiliza el corte por láser, este método también es utilizado cuando es necesario realizar un prototipo por su flexibilidad y gran precisión. Este método de corte consiste en una máquina de control numérico computarizado con un cabezal laser, este laser concentre una gran temperatura en un punto pequeño durante un corto periodo de tiempo, suficiente para cortar la lámina. Este método no es factible para grandes producciones ya que es relativamente rápido para fabricar prototipos, pero muy lento si se requiere fabricar en grandes cantidades [8].

Existen también otros métodos menos convencionales, estos métodos igualmente se utilizan para prototipos, uno de estos métodos es el corte en fresadora CNC. Este método consiste en fijar las láminas y realizar el corte por medio de un cortador de carburo de un pequeño diámetro. Al igual que el corte por láser, el cortador va siguiendo la geometría que fue programada en la máquina, este método resulta ser menos eficiente que el corte por láser, pero es de menor costo.

Para maquinar las láminas con el ultimo método mencionado, es necesario tomar en cuenta que es necesario realizar algunos procedimientos para lograr los mejores resultados posibles. Por medio de ensayos con este método, se llegó a la conclusión de que no es posible

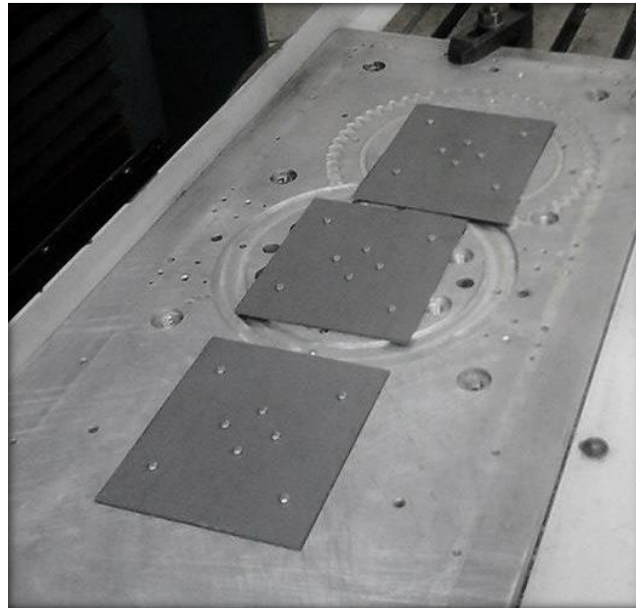


*Figura 2.12. Lamina acondicionada para maquinado.*

realizar el corte de más de dos laminas apiladas, esto porque se generan vibraciones que dañan rápidamente los cortadores. Entonces se determinó que el maquinado de las láminas se realizara de dos por vez. También se determinó que para evitar las vibraciones que afectan la precisión del corte es necesario fijar las láminas en ocho puntos, para fijar las láminas es necesario realizar las 8 perforaciones con un diámetro de 3mm, y realizar en una base de aluminio las mismas perforaciones, pero con diámetro menor para poder fabricarles una rosca M3-05, la cual servirá para fijar las láminas a la placa para poderlas maquinar. Ver figura 2.12.

Ya que se tiene definido la forma en que se acondicionarán las láminas, es necesario saber cuál es la cantidad de láminas que serán acondicionadas. Se definió que el grosor del núcleo será de 68.26mm y que llevará dos placas de acero de 1/8, además de esto hay que considerar que al juntar las láminas se presenta un factor de apilamiento que es de un 80%. Este nos da como resultado una cantidad de 140 láminas para lograr el sólido, para tener un factor de error hay que acondicionar alrededor de 160 láminas.

Para comenzar a maquinar, con ayuda de los tornillos M3-05 montamos las láminas sobre las placas de aluminio. Para realizar los cortes más eficientemente es posible utilizar una placa de aluminio más grande, en donde se realice una matriz con tres juegos de

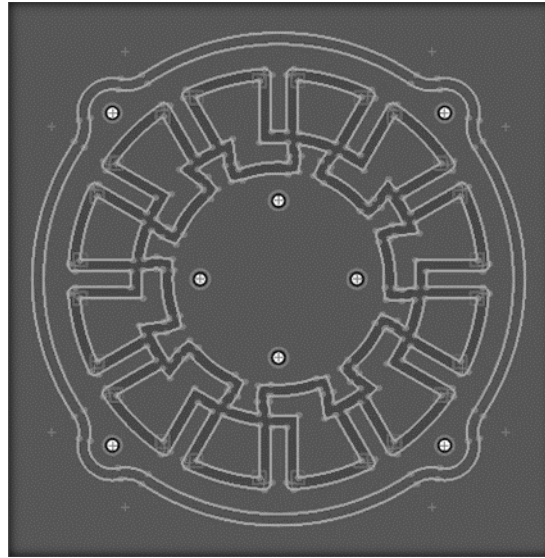


*Figura 2.13. Matriz de láminas para maquinar.*

perforaciones lo que permitirá fijar 6 láminas a la máquina. El tiempo en que la máquina realizara el corte es el mismo, en lo que esto ayuda es que el proceso de cambio de láminas es tardado, al tener tres juegos de láminas, al terminar con una la máquina continuara con la siguiente y en el tiempo que la máquina corta el siguiente juego, es posible desmontar la que ya se cortó y montar otro juego de láminas.

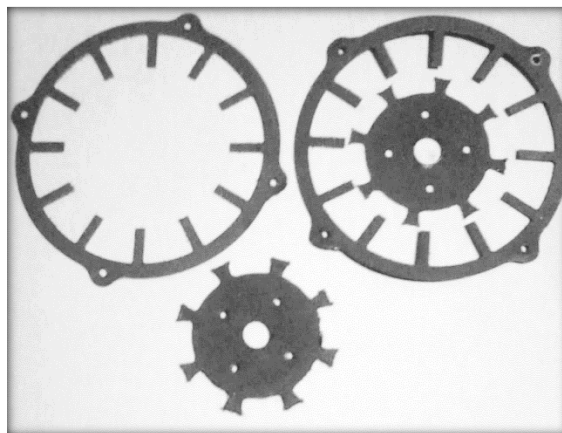
Para continuar con el maquinado, es necesario generar el código para introducirlo a la máquina CNC, esta máquina es una CNC VIWA VF4BM400, la cual necesita un código llamado G, este código es el que le indica a la máquina la trayectoria que debe seguir. Para conseguir este código se parte del diseño que se tiene en un programa de diseño como puede ser en AutoCAD o SolidWorks, posteriormente se exporta a un programa como masterCAM y se genera el código G.

Al tener el código se introduce en la máquina para indicar la trayectoria que seguirá esta trayectoria se muestra en la figura 2.14.

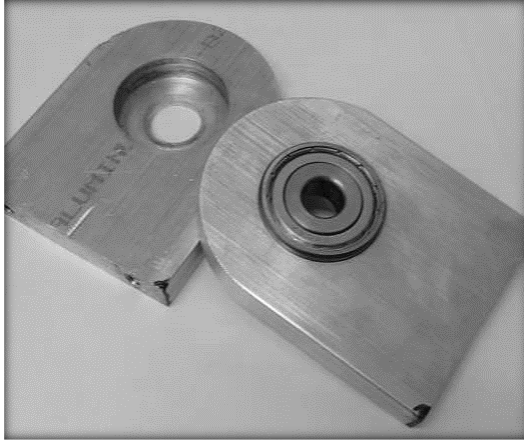


*Figura 2.14. Trayectoria de corte.*

Ya que la máquina tiene definida la trayectoria, lo siguiente es instalar el cortador de 1/8 en la máquina y realizar el set up, esto es para indicarle a la máquina cual es el origen en el eje Z, esto para que la profundidad del corte sea la adecuada, este procedimiento se tiene que realizar cada vez que se reinicia la maquina o cada vez que se cambia al cortador.



*Figura 2.15. Láminas del estator y rotor.*



(a)



(b)

*Figura 2.16. a) Bases para rodamientos; b) Base principal.*

Ya que se tienen maquinadas todas las láminas del estator y del rotor, es necesario maquinar las demás piezas para el motor como lo son las bases para los rodamientos y la base general. Ver figura 2.16 a, b.

### **3. Controlador de motor BLDC**

Una de las principales características de un motor BLDC es que no cuenta con escobillas lo que aumenta su eficiencia, pero esto conlleva a que no cuenta con auto conmutación como en el caso de un motor de convencional. Para poder realizar la conmutación en un motor sin escobillas es necesario contar con un conmutador electrónico externo el cual requiere conocer la posición del rotor.



La mayoría de los controladores de motores BLDC se componen de 4 bloques principales:

- La etapa de potencia, que es donde se encuentra los transistores de potencia MOSFET, esta etapa es la que le entrega directamente la energía al motor.
- El segundo bloque es el encargado de realizar la retroalimentación para indicarle al controlador la posición exacta del rotor, los elementos que se encargan de determinar la posición del rotor son 3 sensores de efecto HALL, en ocasiones esta etapa se puede omitir trabajando en otras técnicas para determinar la posición del rotor como lo puede ser BACK-EMF.
- La tercera etapa es un microcontrolador que es el lee las señales de los sensores de efecto hall y determina que transistores MOSFET tienen que ser activados para realizar el movimiento del motor, también es el encargado de mandar una señal PWM a los transistores para regular la velocidad del motor.
- El último bloque del controlador es el que se encarga de regular la tensión para la alimentación del motor y cada uno del resto de los bloques en el control.

### **3.1. Tipos de control**

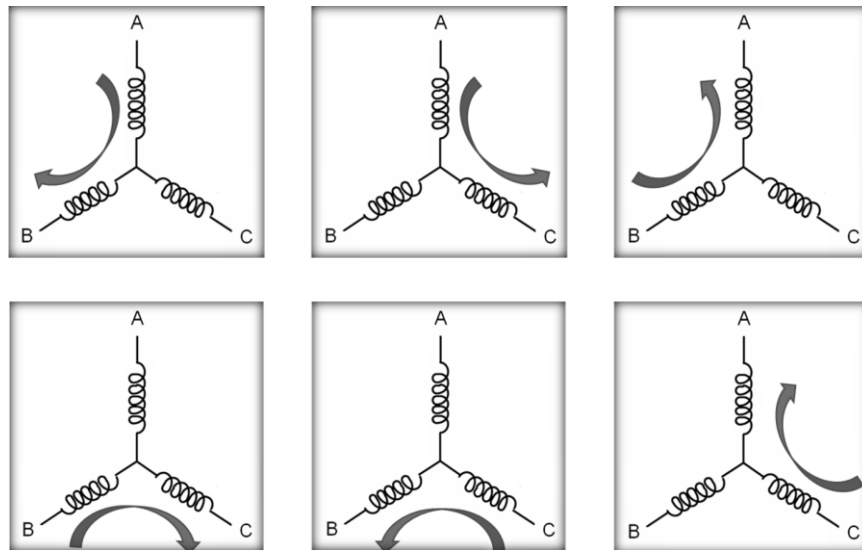
Existen diferentes técnicas de control para los motores BDLC y pueden ser clasificadas por el tipo de conmutación que realizan, esta conmutación puede ser más o menos compleja dependiendo de la aplicación. Los tipos de control más utilizados actualmente son:

- Conmutación trapezoidal (también llamada six steps mode).
- Conmutación sinusoidal.
- Conmutación por control vectorial (Field Oriented Control.)

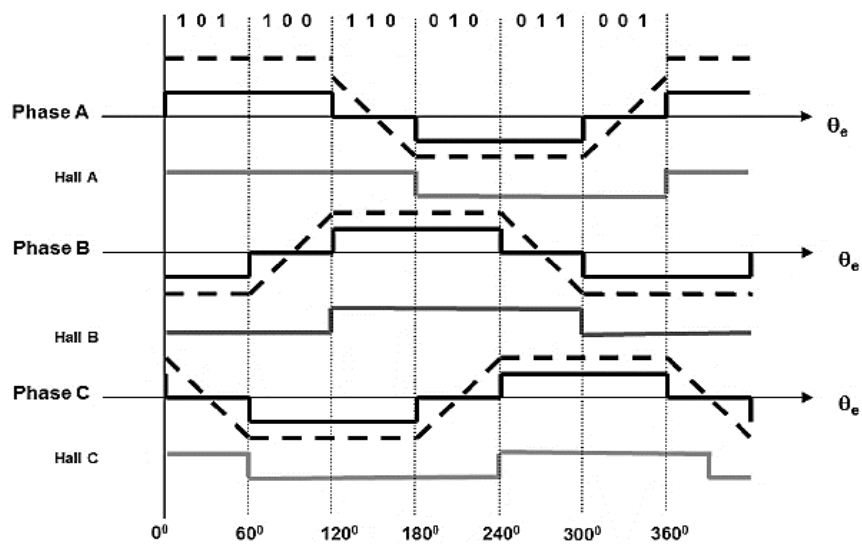
Cada una de estas técnicas tiene como objetivo realizar la excitación de cada una de las fases del motor, cada una de estas técnicas de conmutación depende de la aplicación y se diferencia principalmente por su complejidad.

### 3.1.1. Control trapezoidal

El control trapezoidal o six steps mode es uno de los métodos más simples para la conmutación de motores BLDC. Este método de controla la corriente que circula por las terminales del motor, alimentando un par de bobinas simultáneamente y manteniendo la tercera terminal desconectada. Para realizar el movimiento del rotor las bobinas cambian de polaridad hasta completar las seis combinaciones posibles. Ver figura 2.1.



*Figura 3.1. Representación del "Six steps mode".*



*Figura 3.2. Señales de conmutación por control trapezoidal.*

El principio de este método de conmutación está basado en conocer la posición del rotor por medio de tres sensores de efecto hall que están situados en el motor, estos sensores indican la posición aproximada del rotor, determinando el próximo par de bobinas a alimentar. Ver figura 3.2.

Al no conocer exactamente la posición del rotor la conmutación no es tan eficiente, ya que se produce una desalineación con respecto del estator, esta desalineación produce un rizado en el par resultante, lo que dificulta el control de los motores para aplicaciones de baja velocidad [9].

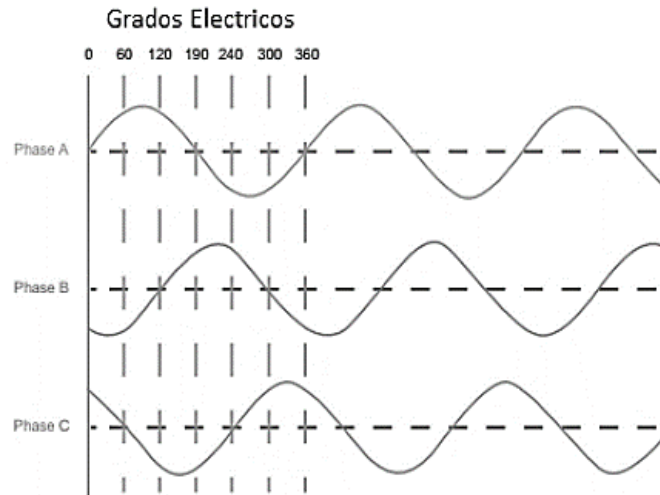
### **3.1.2. Control sinusoidal**

La conmutación sinusoidal es un control más avanzado y más exacto que el control trapezoidal, ya que intenta controlar la posición del rotor continuamente. Este control del rotor se consigue alimentando las tres terminales del estator simultáneamente, para lograr esto se alimentan con corrientes senoidales desfasadas  $120^\circ$ . La fase de las corrientes es determinada de forma que el vector de corrientes resultantes siempre este orientado junto con la posición del rotor. Gracias a esto el par máximo siempre es constante evitando el rizado del control trapezoidal.

Para lograr determinar la secuencia de fases es necesario saber la posición del rotor con mayor exactitud que con los sensores de efecto hall, un dispositivo que puede ofrecer una mejor precisión es el encoder.

Según la ley de corrientes de Kirchhoff la suma de dos de las tres corrientes que entran al nodo es igual al valor negativo de la tercera, por lo tanto, controlando dos de las corrientes aplicadas al motor se controla implícitamente la tercera. Ver figura 3.3.

El principal problema del control sinusoidal es que al tratar de controlar las corrientes que circulan por el estator, que a su vez varían en el tiempo, se genera un gran error cuando las revoluciones son altas, perdiendo drásticamente el par [9].



*Figura 3.3. Señales de conmutación por control sinusoidal.*

### 3.1.3. Control vectorial

El control vectorial o Field Oriented Control es el más complejo de los tres tipos de control de motores BLDC, pero a su vez es el que mejor control proporciona.

El control vectorial cuenta con las mismas características de par que el control sinusoidal pero no controla directamente la corriente en las bobinas del motor. Este tipo de control soluciona este problema controlando el vector de corrientes directamente en un espacio de referencia ortogonal y rotacional, llamado espacio D-Q. este espacio de referencia está normalmente alineado con el rotor de forma que el control de flujo y del par del motor se realicen de forma independiente [9].

## 3.2. Diseño de circuito

Para diseñar el circuito de control es necesario determinar qué tipo de control se utilizará. Como este prototipo está enfocado en los vehículos eléctricos ligeros, en los cuales la precisión a bajas velocidades no es tan necesario se determina utilizar un controlador con conmutación trapezoidal, la determinación de la posición del rotor se realizará por medio de tres sensores de efecto hall.

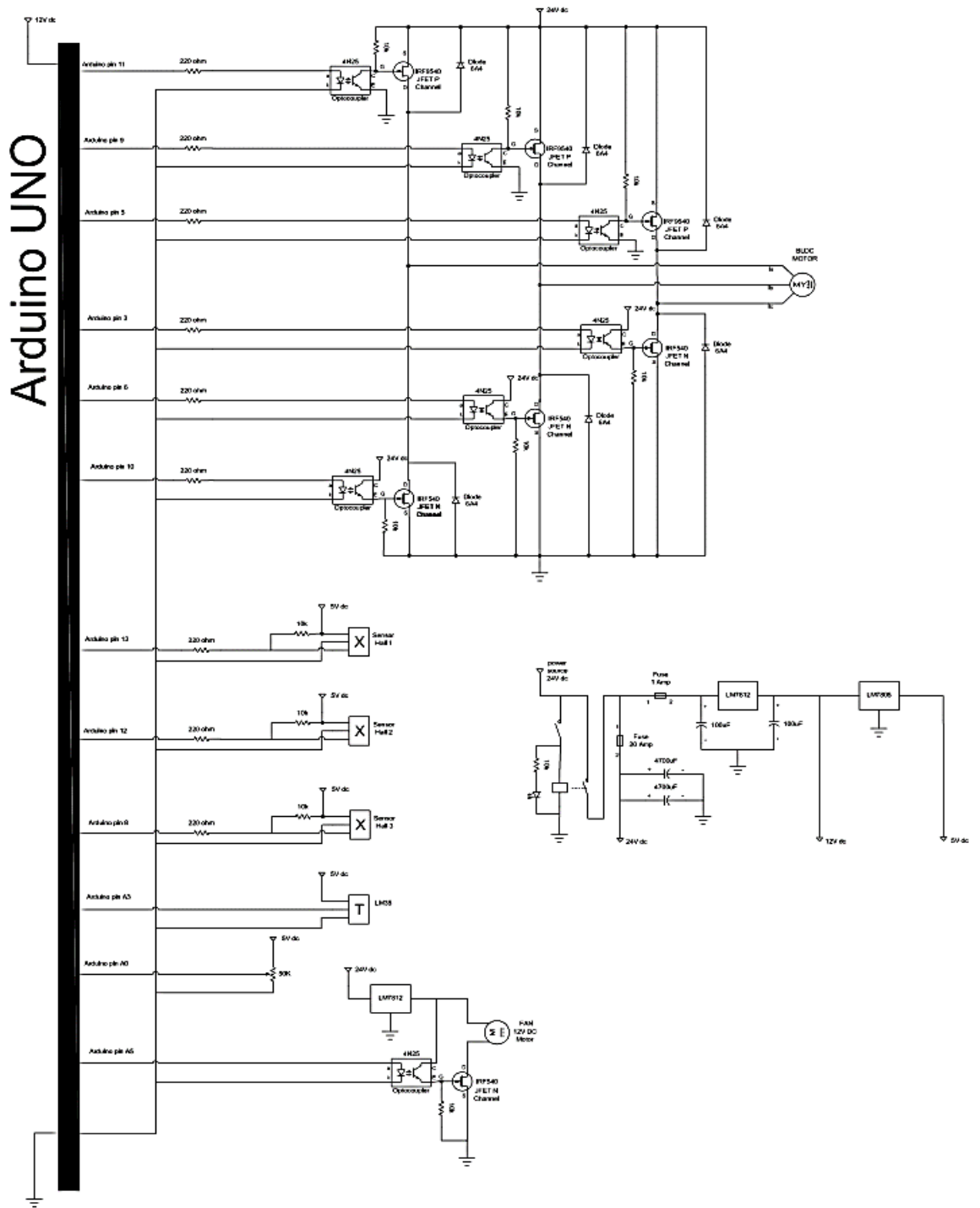
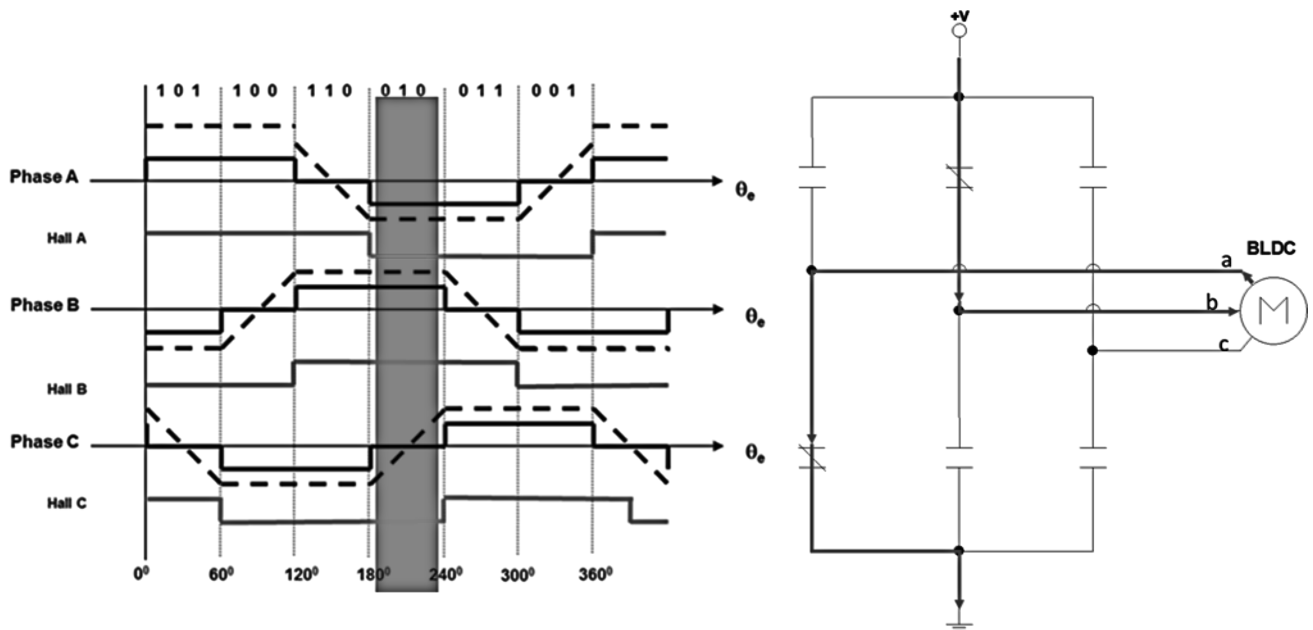


Figura 3.4. Circuito general de control.

### 3.2.1. Conmutación electrónica y puentes trifásicos.



*Figura 3.5. Principio de conmutación de motor BLDC.*

Para controlar un motor BLDC es necesario excitar dos de sus tres fases por medio sus terminales. Para lograr esto se utilizará un puente trifásico que permitirá el paso de la corriente en las seis diferentes combinaciones.

Un puente trifásico básicamente se conforma por seis interruptores que son los encargados de realizar los cambios de corriente en cada combinación.

Para lograr la conmutación de las fases del motor se utiliza un puente trifásico con interruptores, los cuales abren o cierran dependiendo de la fase que se tenga que activar con un polo positivo y la fase que se tenga que activar con un polo negativo. Para lograr esto, en la fase que requiere un polo positivo se cierra el interruptor correspondiente en el lado de arriba y la fase que requiere un polo negativo se activa el interruptor del lado de abajo, lo que provoca que la corriente fluya entrando en la fase que necesita un polo positivo y salga en por la fase que necesita el polo negativo como se muestra en la figura 3.5.

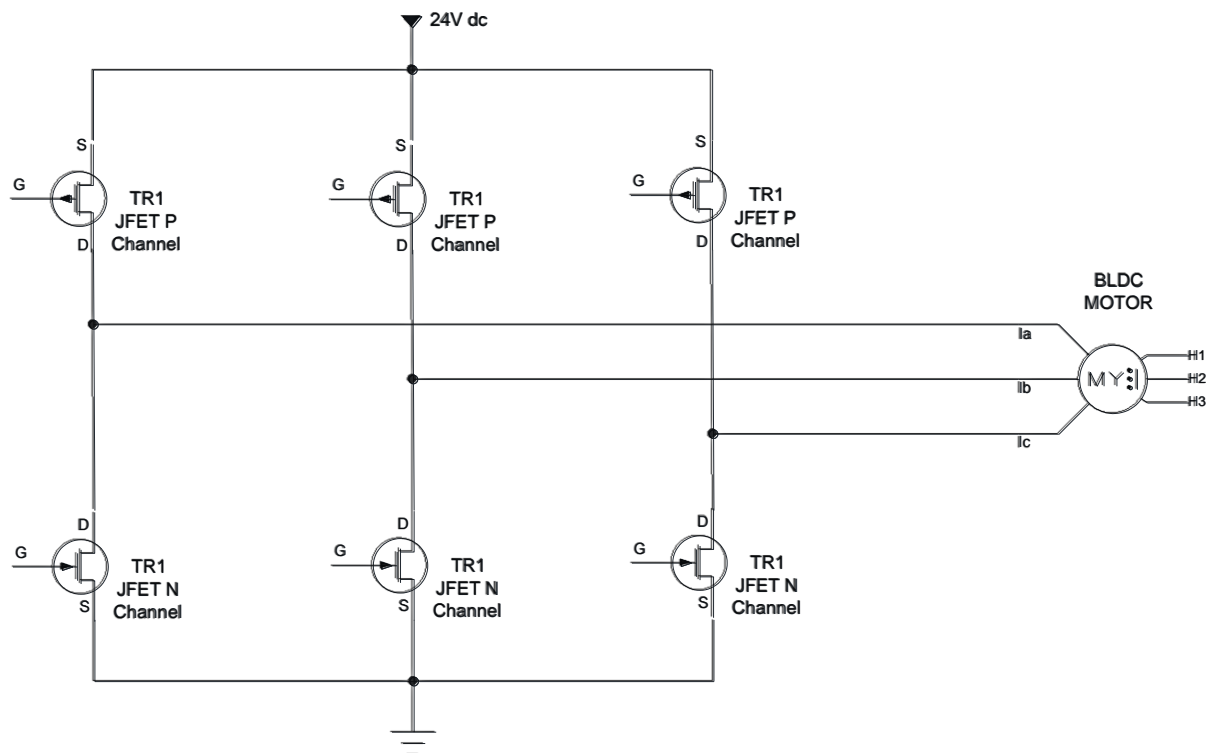
Esta conmutación se tiene que realizar a una gran velocidad para poder tener un par mecánico más estable, lograr esto con interruptores mecánicos resultaría muy complicado y no se tendrían los resultados deseados, por lo que para hacer la conmutación se utilizan

interruptores electrónicos de potencia, conocidos como transistores, específicamente transistores tipo MOSFET que pueden manejar potencias mayores.

La etapa de potencia es la parte fundamental del controlador del motor BLDC, está construida por 6 transistores tipo MOSFET que se encuentran distribuidos en cada una de las 3 fases del circuito, al activar o desactivar cada uno de ellos se logra la conmutación para la alimentación del motor.

Cada una de las fases del inversor cuenta con dos transistores, un transistor MOSFET tipo P y otro transistor MOSFET tipo N.

El transistor tipo P para su funcionamiento necesita que se conecte una tensión positiva en la fuente (source) por lo tanto se coloca en el lado de alta del circuito, al contrario, el transistor tipo N necesita que se conecte la fuente a tierra por lo cual se conecta en el lado de baja del circuito como se muestra en la figura 3.6.

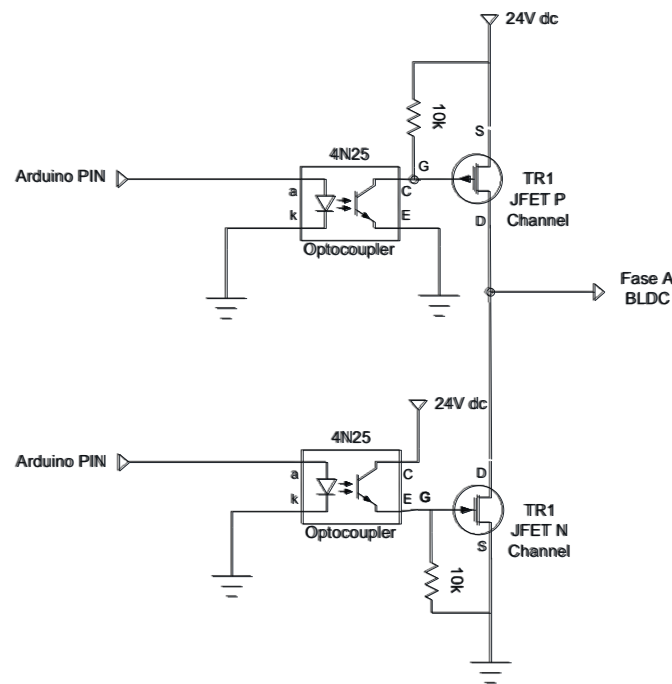


*Figura 3.6. Puente inversor trifásico.*

Al momento de realizar la conmutación en los transistores MOSFET ocurre un pequeño cortocircuito debido a que los transistores no son lo suficientemente rápidos para evitar que el fuete y la tierra queden conectadas directamente, para evitar este problema se utiliza un retardo en cada una de las conmutaciones, este retardo está programado en el microcontrolador y es de  $100\mu\text{s}$ . Además de la conmutación que realizan, los MOSFET son activados por señales PWM que regulan la tensión que llega al motor, en los MOSFET tipo N el ciclo del PWM es constante, pero en los MOSFET tipo P el ciclo puede variarse para controlar la velocidad del motor.

### 3.2.2. Protecciones

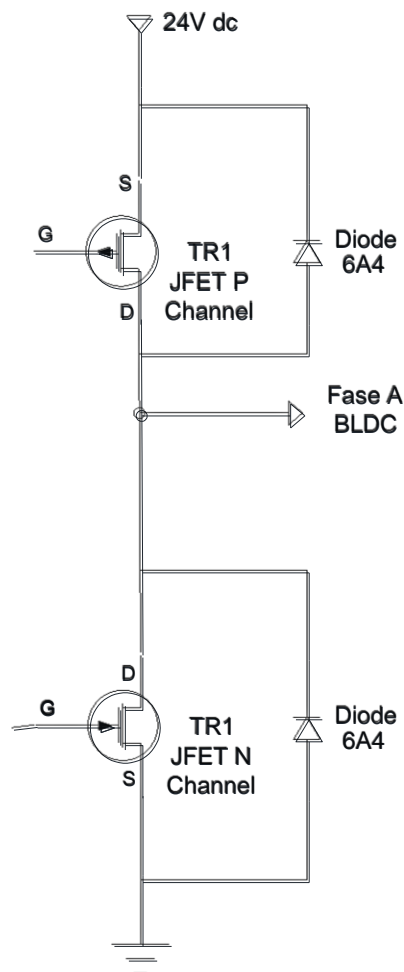
El controlador esta conformado por la etapa de control y la etapa de potencia, es necesario aislar la etapa de control de la etapa de potencia para así evitar que en alguna falla se dañe el controlador. Un método es aislar eléctricamente la etapa de control de la etapa de potencia, mediante acoplamiento óptico con la ayuda de un optoacoplador como se muestra en la figura 3.7, el cual consiste en un diodo infrarrojo y un fototransistor, con lo cual se transmite la señal por medio de una señal óptica [10].



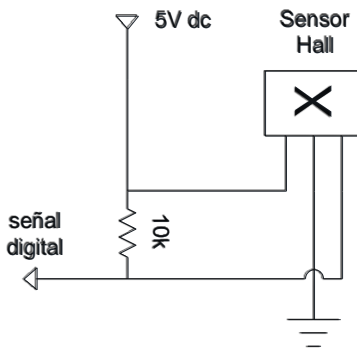
*Figura 3.7. Protección del circuito de control con opto acopladores.*



Utilizar el optoacoplador protegerá el circuito de control, pero al estar conectada una carga inductiva en la etapa de potencia los transistores MOSFET se enfrentan a condiciones de operación que podrían dañarlo muy rápido, esto debido a que las cargas inductivas se oponen al cambio brusco de la corriente, al realizar la conmutación las corrientes residuales del motor podrían causarle daño a los transistores, por eso se coloca un diodo de protección en paralelo entre la fuente y el drenaje del transistor para proporcionar al motor una ruta alternativa para disipar la corriente residual sin dañar al transistor, este arreglo se muestra en la figura 3.8.



*Figura 3.8. Diodo protector de transistor MOSFET.*



*Figura 3.9. Polarización de sensor HALL.*

### 3.2.3. Sensores de posición

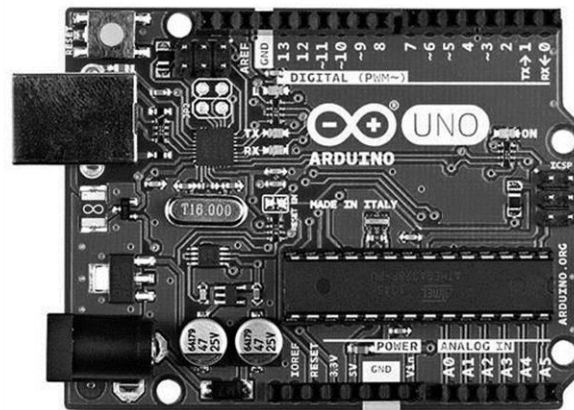
Para determinar la posición del rotor se utilizan 3 sensores de efecto hall los cuales detectan la polaridad de los imanes en el rotor permitiendo saber cuál fase se tiene que energizar y en qué polaridad.

El sensor de efecto hall es un componente electrónico que cuenta con un semiconductor que se polariza con el voltaje de alimentación y al aplicarle un campo magnético entrega un pequeño voltaje a su salida, este voltaje es amplificado por un amplificador operacional integrado [11].

La configuración del circuito para que se active una salida digital cuando se tenga un polo norte consiste en colocar una resistencia de valor alto entre la alimentación y el pin de salida como se muestra en la figura 3.9.

### 3.2.4. Arduino como microcontrolador

Arduino es una placa que es potenciada por un microcontrolador ATMEGA328p el cual permite grabar una programación en un lenguaje basado en c. Al realizar un código compatible con esta interfase es posible llevar a cabo el control del motor. A su vez, es necesario llevar a cabo una lectura de las señales de los sensores y dispositivos instalados en el motor o en el propio controlador.



*Figura 3.10. Microcontrolador Arduino UNO.*

Este microcontrolador recibirá las señales de los tres sensores hall y las procesará junto con la señal de nivel de velocidad y dirección para mandar las señales a los optoacopladores que serán los que activen los MOSFET.

### **3.2.5. Diagrama de control y código de programación**

Para poder generar el código de funcionamiento primero se tiene que definir el algoritmo de control y pasarlo a un diagrama de flujo donde explique cómo se desarrolla el funcionamiento del control.

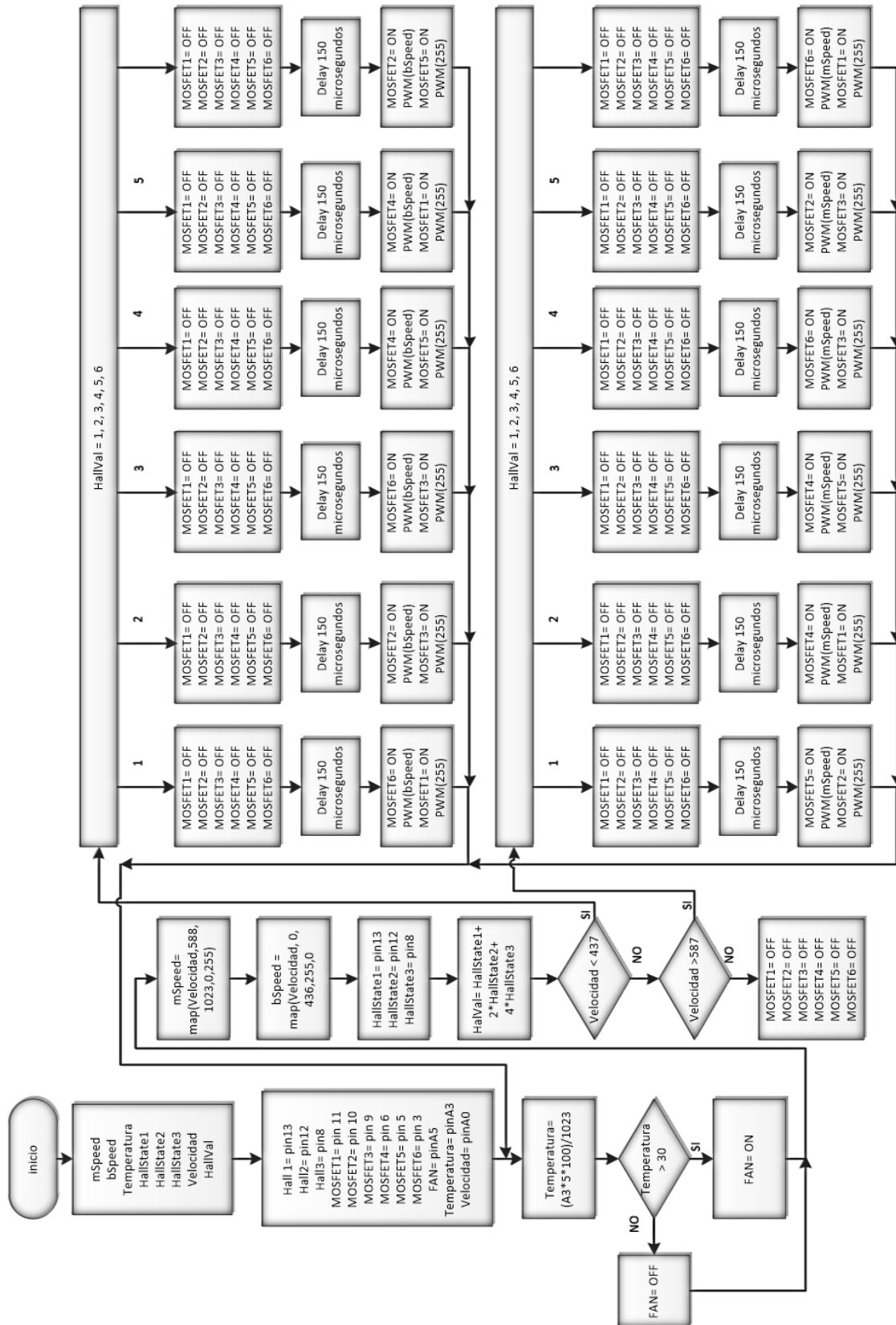


Figura 3.11. Diagrama de flujo del funcionamiento del controlador.

Con base al diagrama podemos generar al código para el funcionamiento del motor.

```
int HallState1; //Variable de estado del sensor hall 1
int HallState2; //Variable de estado del sensor hall 2
int HallState3; //Variable de estado del sensor hall 3
int HallVal = 1; //Valor binario que toman los tres sensores hall

int mSpeed = 0;
int bSpeed = 0;

int throttle = 0;

float temperatura = 0;
void setup() {
  pinMode(8,INPUT); // Hall 1 entrada
  pinMode(12,INPUT); // Hall 2 entrada
  pinMode(13,INPUT); // Hall 3 entrada

  pinMode(3, OUTPUT);
  pinMode(5, OUTPUT);
  pinMode(6, OUTPUT);
  pinMode(9, OUTPUT);
  pinMode(10, OUTPUT);
  pinMode(11, OUTPUT);
  pinMode(A5, OUTPUT);
}

void loop() {
  temperatura = (5.0 * analogRead(A3)*100.0)/1023.0;
```

```
//esto enciende y apaga el ventilador
if (temperatura > 30){//cambiar numero en funcion de lo que se desee
digitalWrite(A5,HIGH);

}else {
digitalWrite(A5,LOW);
}

throttle = analogRead(0);
mSpeed = map(throttle, 588, 1023, 0, 255);
bSpeed = map(throttle, 0, 436, 255, 0);

HallState1 = digitalRead(13); // read input value from Hall 1
HallState2 = digitalRead(12); // read input value from Hall 2
HallState3 = digitalRead(8); // read input value from Hall 3

HallVal = (HallState1) + (2*HallState2) + (4*HallState3);

if (throttle < 437)
{
switch (HallVal)
{
case 1:
analogWrite(3,0);
analogWrite(5,0);
analogWrite(6,0);
analogWrite(9,0);
analogWrite(10,0);
analogWrite(11,0);
delayMicroseconds(150);
analogWrite(3,bSpeed);
```

```
    analogWrite(11,255);  
    break;  
case 2:  
    analogWrite(3,0);  
    analogWrite(5,0);  
    analogWrite(6,0);  
    analogWrite(9,0);  
    analogWrite(10,0);  
    analogWrite(11,0);  
    delayMicroseconds(150);  
    analogWrite(10,bSpeed);  
    analogWrite(9,255);  
    break;  
case 3:  
    analogWrite(3,0);  
    analogWrite(5,0);  
    analogWrite(6,0);  
    analogWrite(9,0);  
    analogWrite(10,0);  
    analogWrite(11,0);  
    delayMicroseconds(150);  
    analogWrite(3,bSpeed);  
    analogWrite(9,255);  
    break;  
case 4:  
    analogWrite(3,0);  
    analogWrite(5,0);  
    analogWrite(6,0);  
    analogWrite(9,0);  
    analogWrite(10,0);  
    analogWrite(11,0);
```

```
    delayMicroseconds(150);
    analogWrite(6,bSpeed);
    analogWrite(5,255);
    break;
case 5:
    analogWrite(3,0);
    analogWrite(5,0);
    analogWrite(6,0);
    analogWrite(9,0);
    analogWrite(10,0);
    analogWrite(11,0);
    delayMicroseconds(150);
    analogWrite(6,bSpeed);
    analogWrite(11,255);
    break;
case 6:
    analogWrite(3,0);
    analogWrite(5,0);
    analogWrite(6,0);
    analogWrite(9,0);
    analogWrite(10,0);
    analogWrite(11,0);
    delayMicroseconds(150);
    analogWrite(10,bSpeed);
    analogWrite(5,255);
    break;
}
}
if (throttle > 587)
{
    switch (HallVal)
```



```
{  
  case 1:  
    analogWrite(3,0);  
    analogWrite(5,0);  
    analogWrite(6,0);  
    analogWrite(9,0);  
    analogWrite(10,0);  
    analogWrite(11,0);  
    delayMicroseconds(150);  
    analogWrite(10,mSpeed);  
    analogWrite(5,255);  
    break;  
  case 2:  
    analogWrite(3,0);  
    analogWrite(5,0);  
    analogWrite(6,0);  
    analogWrite(9,0);  
    analogWrite(10,0);  
    analogWrite(11,0);  
    delayMicroseconds(150);  
    analogWrite(6,mSpeed);  
    analogWrite(11,255);  
    break;  
  case 3:  
    analogWrite(3,0);  
    analogWrite(5,0);  
    analogWrite(6,0);  
    analogWrite(9,0);  
    analogWrite(10,0);  
    analogWrite(11,0);  
    delayMicroseconds(150);
```

```
    analogWrite(6,mSpeed);
    analogWrite(5,255);
    break;
case 4:
    analogWrite(3,0);
    analogWrite(5,0);
    analogWrite(6,0);
    analogWrite(9,0);
    analogWrite(10,0);
    analogWrite(11,0);
    delayMicroseconds(150);
    analogWrite(3,mSpeed);
    analogWrite(9,255);
    break;
case 5:
    analogWrite(3,0);
    analogWrite(5,0);
    analogWrite(6,0);
    analogWrite(9,0);
    analogWrite(10,0);
    analogWrite(11,0);
    delayMicroseconds(150);
    analogWrite(10,mSpeed);
    analogWrite(9,255);
    break;
case 6:
    analogWrite(3,0);
    analogWrite(5,0);
    analogWrite(6,0);
    analogWrite(9,0);
    analogWrite(10,0);
```

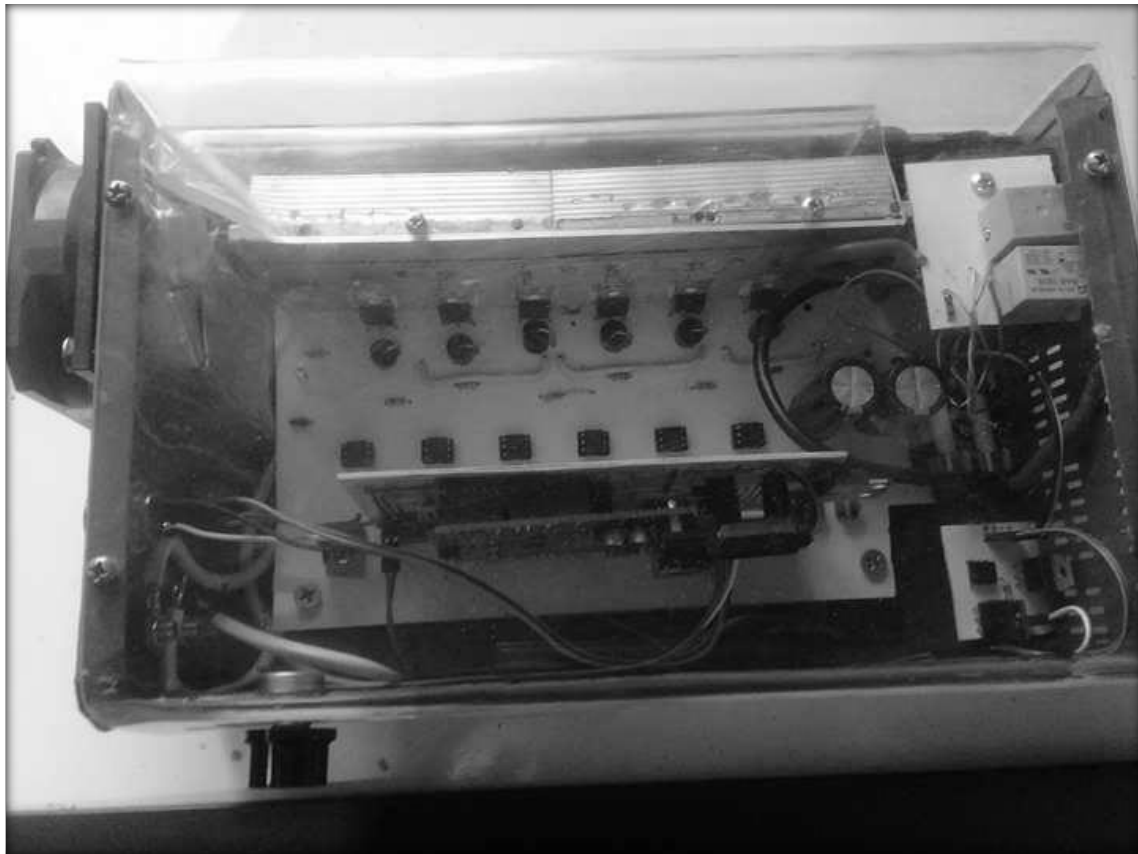
```
    analogWrite(11,0);
    delayMicroseconds(150);
    analogWrite(3,mSpeed);
    analogWrite(11,255);
    break;
  }
}
else
{
  analogWrite(3,0);
  analogWrite(5,0);
  analogWrite(6,0);
  analogWrite(9,0);
  analogWrite(10,0);
  analogWrite(11,0);
}
}
```

*Figura 3.12. Código para microcontrolador Arduino UNO.*

### 3.3. Fabricación de controlador

Ya que se cuenta con todos los circuitos que conformaran el controlador, se procede a fabricar cada una de las placas que conformaran el controlador. Se fabricará una placa para la etapa de potencia en donde se encontrarán los MOSFET junto con sus debidas protecciones, así como las protecciones para el microcontrolador, en esta misma placa se encontrarán las terminales para conectarla con la placa del microcontrolador. Se fabricará también la placa para el microcontrolador, donde se instalarán terminales para acoplar y desacoplar el Arduino UNO en caso de falla o reprogramación.

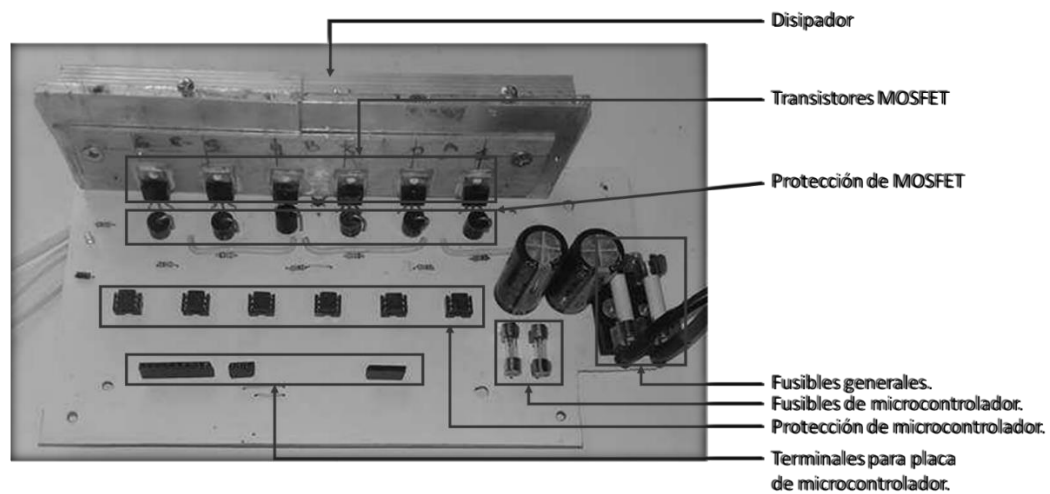
Además, en el controlador se instalarán otros dispositivos como una placa que controlará el sistema de ventilación y otra más que realizará la función de control de entrada de potencia del controlador ver figura 3.13.



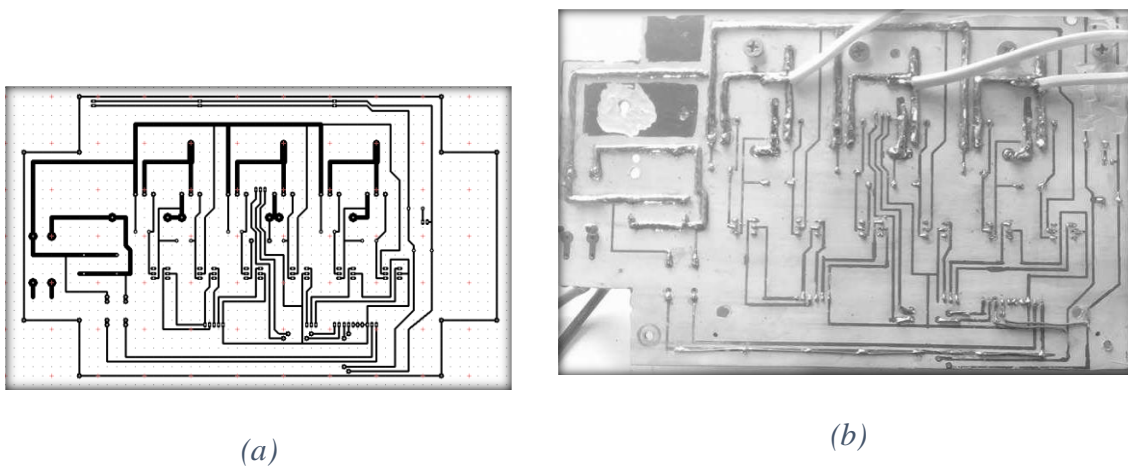
*Figura 3.13. Controlador de motor BLDC.*

### 3.3.1. Placa de potencia

La figura 3.14 muestra los componentes de la placa de potencia donde estan montados los transistores MOSFET y las protecciones, en la figura 3.15 a podemos ver el diseño de la placa de pcb y en al figura 3.15b la placa impresa con sus refuerzos de alta corriente.



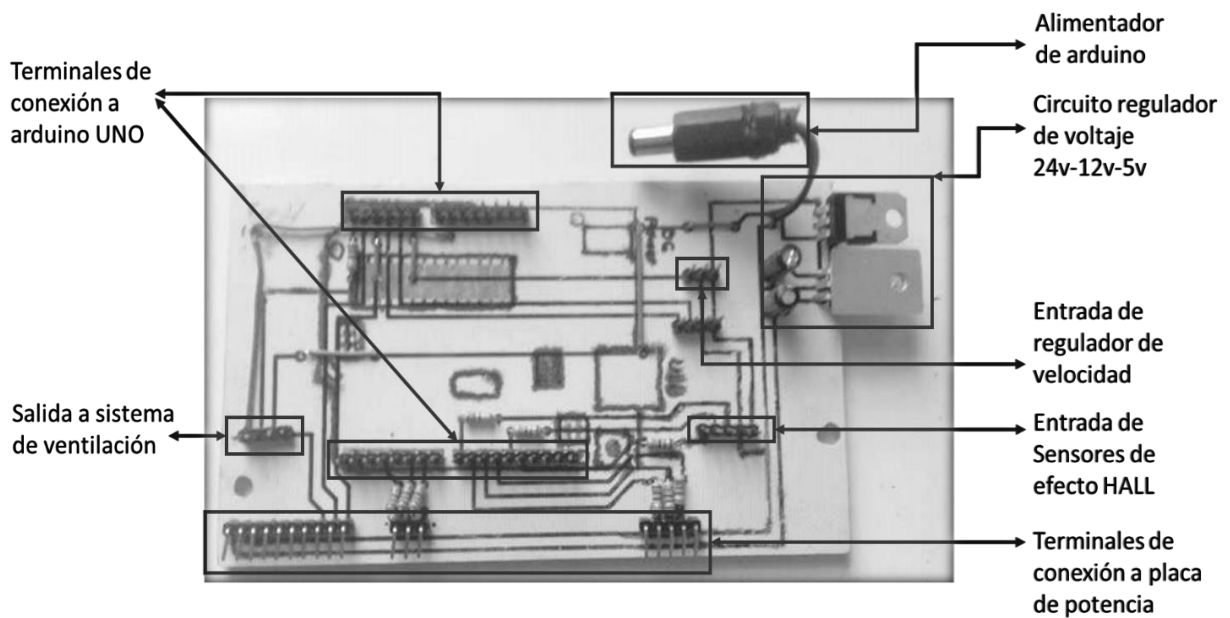
*Figura 3.14. Componentes de placa de potencia.*



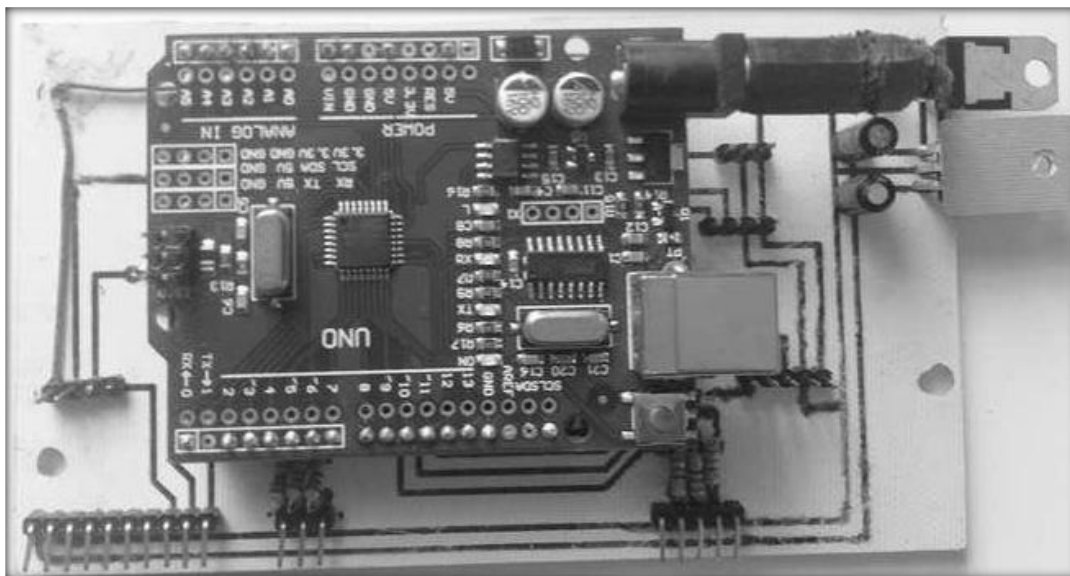
*Figura 3.15. a) Diseño pcb para placa de potencia; b) placa de potencia impresa y con refuerzos en conductores de alta corriente.*

### 3.3.2. Placa de control

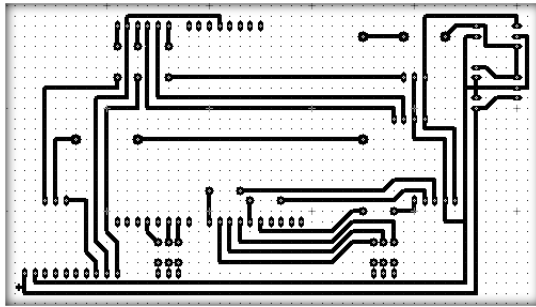
La figura 3.16 muestra los componentes de la etapa de control donde se encuentran los reguladores de voltaje y la terminales para conectar el arduino, la figura 3.17 muestra como queda conectado la placa arduino sobre la etapa de control. Las imágenes 3.18 a y b muestran el diseño del pcb y el resultado final de la impresión.



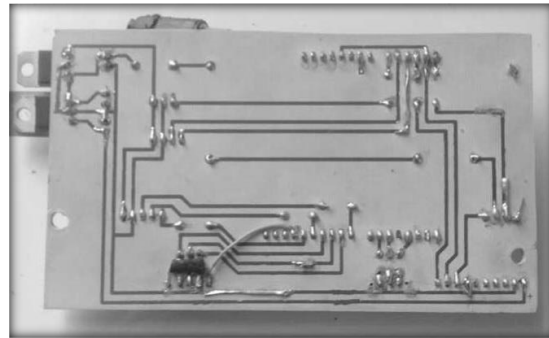
*Figura 3.16. Componentes de placa de control.*



*Figura 3.17. Placa de control con microcontrolador arduino UNO.*



(a)



(b)

*Figura 3.18. a) Diseño de pcb para placa de control; b) Placa de control impresa.*



*Figura 3.19. Placa para montar sensores HALL.*

### 3.3.3. Placa de sensores

La figura 3.19 muestra ambas caras de la placa de sensores, con los 3 sensores de efecto hall ya configurados.

### 3.3.4. Componentes adicionales

En el controlador se instalaron otros sistemas que son importantes para su funcionamiento, se instaló un sistema de ventilación que consta de un ventilador y un ducto que dirige la ventilación a través del disipador de los MOSFET, este ventilador es activado por un sensor de temperatura instalado en la placa de potencia. También se instaló una placa que controla la alimentación del controlador, esta placa se activa con un interruptor y realiza un enclavamiento de dos relevadores.

## 4. Ensamble

Ya que se fabricaron las láminas para el rotor y el estator, así como las placas que se utilizaran para compactar las láminas se puede proceder con el ensamble de cada una de las partes del motor.

Antes de compactar las láminas es necesario acondicionarlas, debido a que después del proceso de corte las láminas presentan imperfecciones en sus bordes por lo que para eliminarlos es necesario limar cada una de las láminas para dejarlas completamente lisas, de no hacer esto al momento de apilarlas las partículas quedarían entre ellas bajando en gran porcentaje el flujo que circulará por el núcleo y por lo tanto la eficiencia del motor.



(a)



(b)

**Figura 4.1.** a) *Proceso de barnizado de láminas;* b) *Láminas listas para ensamblar.*

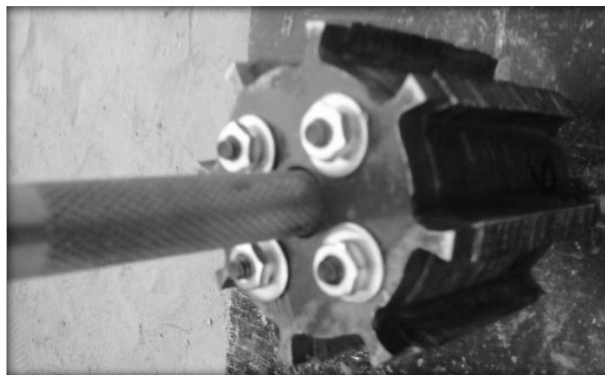
Posteriormente, se procede a aplicarles una capa de barniz dieléctrico, para realizar este proceso se colocan en una superficie limpia las placas y se les aplica una capa de barniz por medio de una pistola de aire ver figura 3.1. Estas láminas se dejan secar por alrededor de 30 min y se procede a darles la vuelta para aplicarles una capa de barniz por la cara posterior.



## 4.1. Ensamble del rotor



*Figura 4.2. Láminas de rotor apiladas y comprimidas.*



*Figura 4.3. Proceso de inserción de flecha en rotor.*

### 4.1.1. Láminas

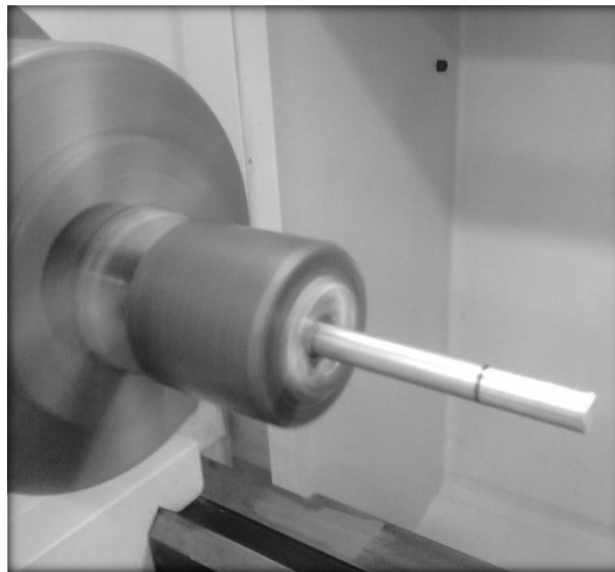
Ya que las láminas están listas para ensamblarse, con ayuda de 4 tornillos que servirán de guía. Se apilan las láminas del rotor, comenzando con una de las placas de 1/8 y después 140 de las láminas para terminar también con una placa de 1/8. Después de que las láminas están apiladas con ayuda de tuercas se comprimen hasta obtener el espesor de 68.26mm ver figura 4.2.

### 4.1.2. Eje del rotor

Posteriormente a que se tiene el núcleo del rotor, es necesario colocar la flecha para poder transferir su potencia. Para ello con una broca de  $\frac{1}{2}$  se realiza el barreno en el centro del rotor, posteriormente con una rima de 501 milésimas de pulgada se le agrega precisión al



*Figura 4.4. Montaje de imanes permanentes.*



*Figura 4.5. Detallado final de rotor.*

barreno. Ya que el barreno esté listo, utilizando una prensa, se inserta la flecha en el barreno hasta que haya entrado toda el área con el moleteado ver figura 4.3.

#### **4.1.3. Imanes permanentes**

Ya que esté listo el núcleo del rotor junto con la flecha, se procede a montar los imanes permanentes en las cavidades del rotor, para esto se utilizará resina epoxi. Puede ser necesario utilizar una herramienta rotatoria tipo mototool para realizar ajustes en el núcleo en caso de imperfecciones ver figura 4.4.

Ya que la resina haya secado, montamos el rotor en un torno para observar si existe un desbalance y para quitarle cualquier rebaba o resto de resina ver figura 4.5.



*Figura 4.6. Láminas del estator apiladas.*

## **4.2. Ensamble del estator**

### **4.2.1. Láminas**

Al igual que el rotor, para lograr el núcleo del estator es necesario aplicar las láminas entre las dos placas de acero de 1/8 y comprimirla con ayuda de los tornillos. Ya que las láminas están comprimidas se soldarán soportes externos al estator para poder extraer los tornillos que ayudaron a comprimirlo ver figura 4.6.

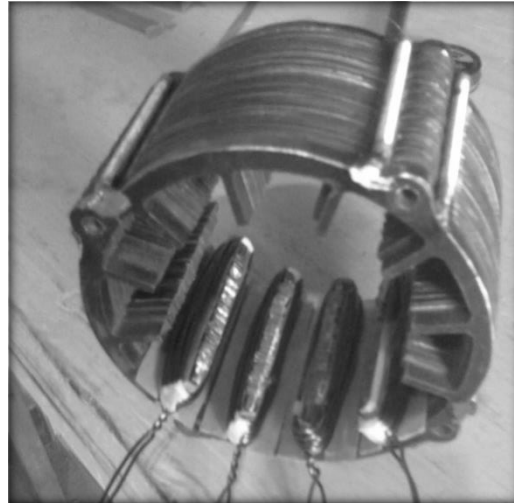
### **4.2.2. Devanados**

Ya que está listo el núcleo del estator lo que sigue es instalar los devanados. Para instalar las bobinas en los brazos del estator es necesario primero aislar las ranuras, para esto se utiliza papel NOMEX. Después de instalar el recubrimiento para proteger las bobinas se procede a hacer las bobinas. Como la instalación de las bobinas solo consiste en insertarlas en los brazos del estator, es posible fabricarlas aparte.

Con ayuda de un molde de madera con las dimensiones de los brazos del estator se fabrican las bobinas para posterior a eso montarlas en el estator ver figura 4.7a.



(a)



(b)

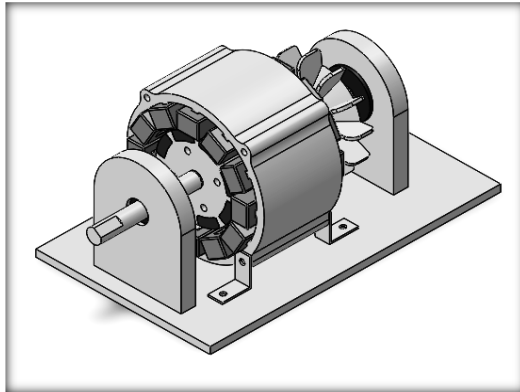
*Figura 4.7. a) Fabricación de bobinas; b) Instalación de bobinas en estator.*

Después de instalar todas las bobinas en el estator se les aplica resina en sus extremos para evitar que se muevan de su lugar, ver figura 4.7b.

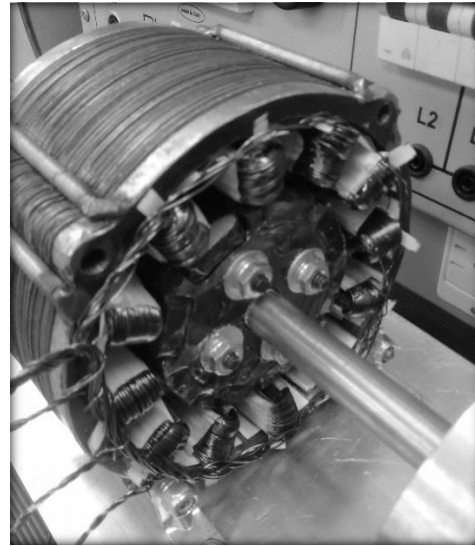
### **4.3. Ensamble final del motor**

#### **4.3.1. Instalación de estator y rotor**

Ya que se tienen ensamblado el rotor y el estator por separado, lo siguiente es montar ambos en la placa base. Primero se fija una de las bases de los rodamientos en la placa base y se introduce el eje del rotor en el rodamiento hasta que tope con el retén. Después de eso se fija el estator por medio de las escuadras y los orificios ya barrenados. Finalmente se instala la segunda base de rodamiento en el eje del rotor y se fija a la placa base. Ver figura 4.8.



(a)

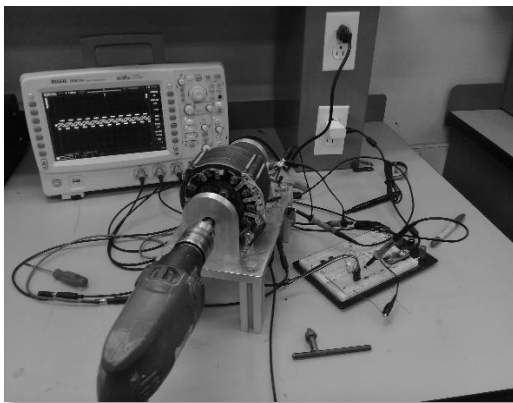


(b)

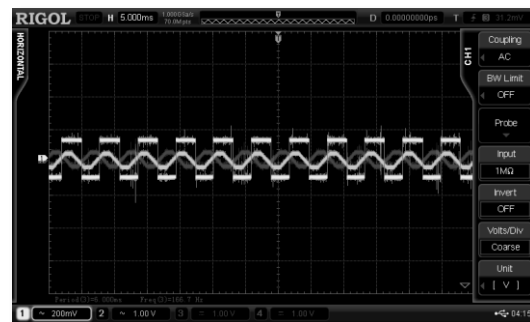
*Figura 4.8. a) Modelo en computadora; b) Ensemble físico.*

#### 4.3.2. Instalación de placa de sensores y terminales

Finalmente se instalan la placa de sensores en el motor, para realizar este proceso se monta sobre el estator la placa con los sensores y se aplica resina para fijarlos. Para asegurarse de que los sensores están bien calibrados se utiliza un osciloscopio para observar que la salida de cada uno de los sensores este en fase con los devanados del motor. Ver figura 4.9.



(a)

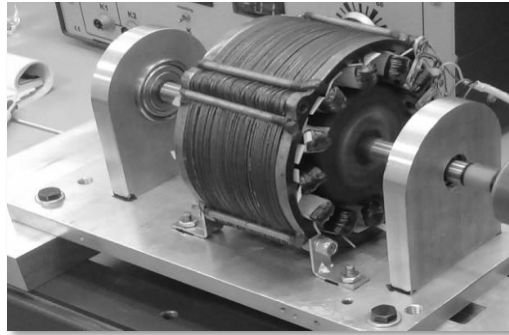


(b)

*Figura 4.9. a) Calibración de sensores; b) Señal de salida sensor HALL contra fases.*

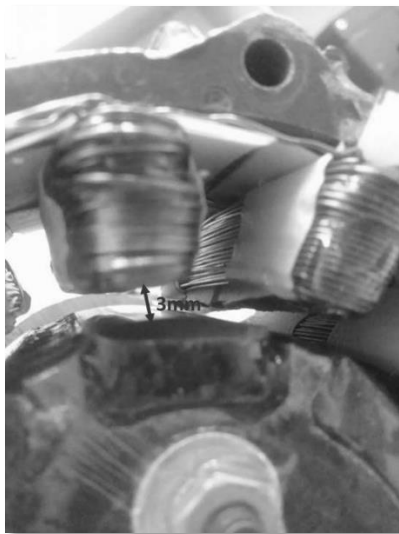
### 4.3.3. Prototipo terminado

Finalmente, después del ensamble de todos los elementos del motor se tiene el conjunto listo para funcionar como lo muestra la figura 4.10.



*Figura 4.10. Prototipo final de motor BLDC.*

Como ya se esperaba en el diseño de las geometrías del rotor y del estator se tiene un entrehierro de alrededor de 3mm y debido al método de fabricación de las láminas del motor se presentan algunas imperfecciones en el núcleo del estator ver figura 4.11, estas imperfecciones, además de el gran entrehierro que se tiene afectaran considerablemente la eficiencia del motor.



(a)



(b)

*Figura 4.11. a) Entrehierro; b) Imperfecciones en el núcleo del estator.*

## 5. Análisis del motor

### 5.1. Pruebas de funcionamiento

Después de que el motor fue ensamblado y que se realizaron las pruebas para comprobar que el controlador funcionara adecuadamente, se conectaron el motor y el controlador. En las primeras pruebas de funcionamiento el motor contaba con devanados de 14 vueltas con un calibre de conductor del 16AWG cada uno de los devanados de cada fase fue conectado en paralelo y una conexión en estrella entre las fases. Con estas condiciones al momento de activar el controlador el motor no presento buenos resultados, puesto que al tener baja impedancia las corrientes se elevaron sin demostrar una gran potencia mecánica como se muestra en la tabla 5.1.

*Tabla 5.1. Resultados de primera prueba del motor BLDC sin carga.*

<b>Medición</b>	<b>Voltaje (V)</b>	<b>Corriente (A)</b>	<b>Velocidad (rpm)</b>
<b>1</b>	20	3.3	88
<b>2</b>	19	4.4	125
<b>3</b>	18.4	6.3	193
<b>4</b>	17	7.2	205

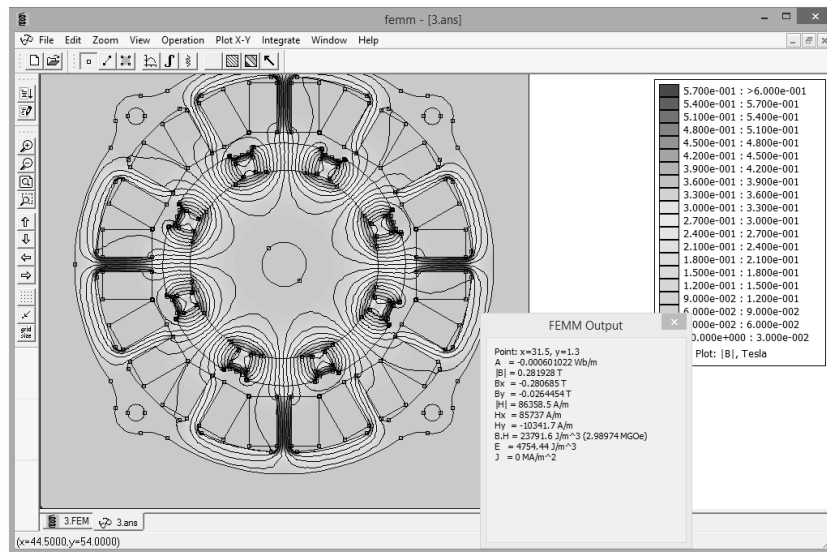
Posterior a estos resultados el motor fue rebobinado y sus características fueron de 80 vueltas por devanado, igualmente conectados en paralelo entre sí y en estrella entre las fases los resultados de esta modificación se muestran en la tabla 5.2.

*Tabla 5.2. Resultados de segunda prueba del motor BLDC sin carga.*

<b>Medición</b>	<b>voltaje (V)</b>	<b>corriente (A)</b>	<b>velocidad (rpm)</b>
<b>1</b>	24	0.6	780
<b>2</b>	23	0.9	1400
<b>3</b>	23	1.1	1710
<b>4</b>	23	1.2	1950
<b>5</b>	23	1.3	2000

## 5.2. Software FEMM

FEMM es un software para resolver problemas magnéticos, electrostáticos en dos dimensiones. Este programa es un procesador de interfaz de documentos múltiples y un post-procesador para los diversos tipos de problemas solucionados por FEMM. Contiene un interfaz tipo CAD para establecer la geometría del problema y las condiciones de contorno. Este programa puede aceptar la importación de archivos tipo DXF para poder analizar las geometrías realizadas en programas como AutoCAD y SolidWorks. El programa también permite al usuario inspeccionar valores en puntos aleatorios, así como evaluar distintas integrales y trazar varias cantidades de interés en los límites definidos ver figura 5.1.



*Figura 5.1. Modelado de motor BLDC en software FEMM.*

### Software FEMM

#### 5.2.1. Método de análisis de problemas magnetostáticos por FEMM

FEMM trabaja con problemas de casos limitantes de las ecuaciones de Maxwell. Los problemas magnéticos analizados son aquellos que pueden ser considerados de baja frecuencia. Los problemas magnetostáticos son problemas en donde los campos son invariantes en el tiempo. En este caso la intensidad de campo ( $H$ ) y la densidad de flujo ( $B$ ) se obtienen:



$$\nabla \times H = J \quad (5.1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (5.2)$$

Para definir una relación constructiva entre ( $B$ ) y ( $H$ ) para cada material:

$$B = \mu H \quad (5.3)$$

Si se trabaja con un material no lineal la permeabilidad ( $\mu$ ) está dada en función de ( $B$ ):

$$\mu = \frac{B}{H(B)} \quad (5.4)$$

FEMM se dedica a encontrar un campo que satisfaga las ecuaciones anteriores a través de un enfoque vectorial magnético. La densidad del flujo se escribe en términos del potencial vectorial ( $A$ ):

$$B = \nabla \times A \quad (5.5)$$

Ahora, la definición de  $B$  se puede describir la primera ecuación como:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu(B)} \nabla \times A \right) = J \quad (5.6)$$

Para un material isotrópico lineal la ecuación anterior se puede describir como:

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 = J \quad (5.7)$$

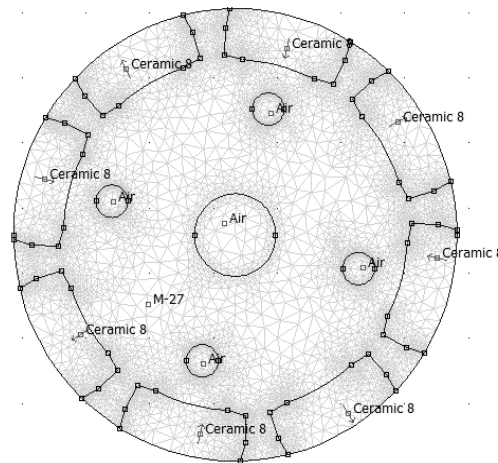
FEMM retiene la forma (5.6) para que los problemas con materiales con una relación B-H no lineal puedan ser resueltos.

En el caso 3-D general,  $A$  es un vector con tres componentes. En cambio, cuando se realizan problemas en un plano 2-D dos de los tres componentes son cero dejando solamente un componente con dirección hacia afuera de la página. La ventaja de utilizar la formulación potencial vectorial es que todas las condiciones han sido cambiadas en una sola ecuación. Si  $A$  es encontrado,  $B$  y  $H$  pueden ser dedicados diferenciando  $A$ . la ecuación 5.6 es una

ecuación diferencial empírica que surge en el estudio de muchos diferentes fenómenos de ingeniería. Hay un gran número de herramientas que han sido desarrolladas a lo largo de los años para resolver este problema particular [12].

### 5.2.2. Análisis de elemento finito por FEMM

Aunque las ecuaciones diferenciales para resolver los problemas parecen relativamente compactas, es muy difícil obtener soluciones de forma cerrada para todas las geometrías excepto las más simples. Aquí es donde entra en juego el análisis de elementos finitos, que consiste en dividir la geometría en un gran número de regiones como se muestra en la figura 5.2, cada una con una geometría simple.

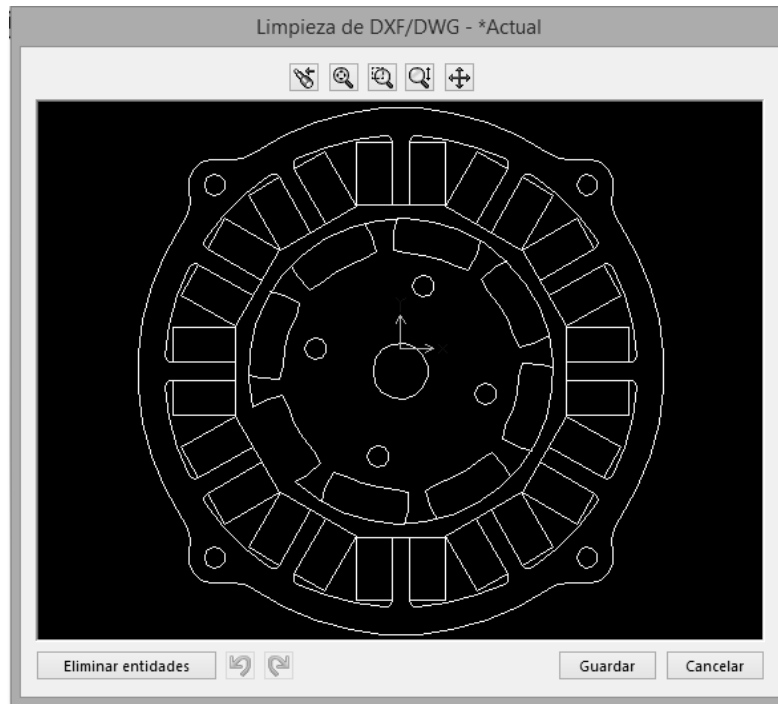


*Figura 5.2. División de rotor de imanes permanentes para análisis de elementos finitos.*

Sobre estas geometrías simples, la solución “verdadera” para el potencial deseado se aproxima para una función muy simple. Si se utilizan suficientes regiones pequeñas el potencial aproximado coincide estrechamente con la solución exacta. La ventaja de fragmentar la geometría es que de tener un pequeño problema muy difícil de resolver pasamos a un gran número de problemas pero que son relativamente fácil de resolver. Para resolver este problema se recurre a un proceso de discretización, un problema de algebra lineal se forma con quizá decenas de miles de incógnitas. Sin embargo, existen algoritmos que permiten resolver el problema de algebra lineal resultante, normalmente en un corto periodo de tiempo [12].

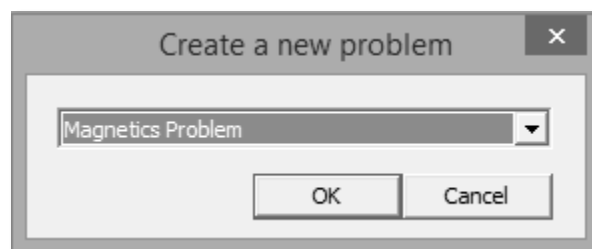
### 5.2.3. Importación de diseño al software

Para poder analizar el motor es necesario importar la geometría al programa FEMM por lo que se necesita crear un archivo tipo DXF del mismo. Ver figura 5.3.



*Figura 5.3. Geometría del motor en formato .dxf.*

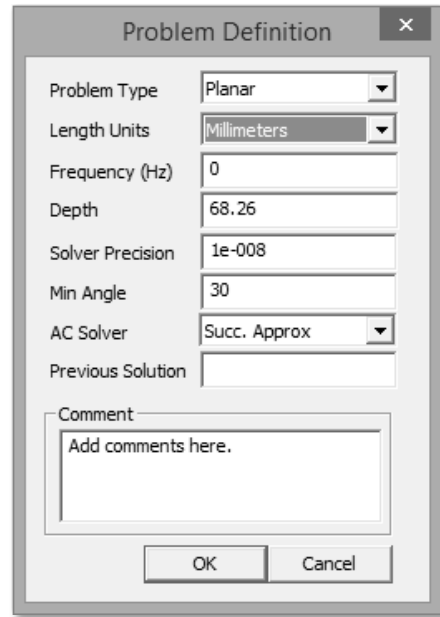
Posterior a eso se abre el programa FEMM y se crea un nuevo problema y se selecciona la opción de “magnetics problem”. Ver figura 5.4.



*Figura 5.4. Generando un nuevo problema.*

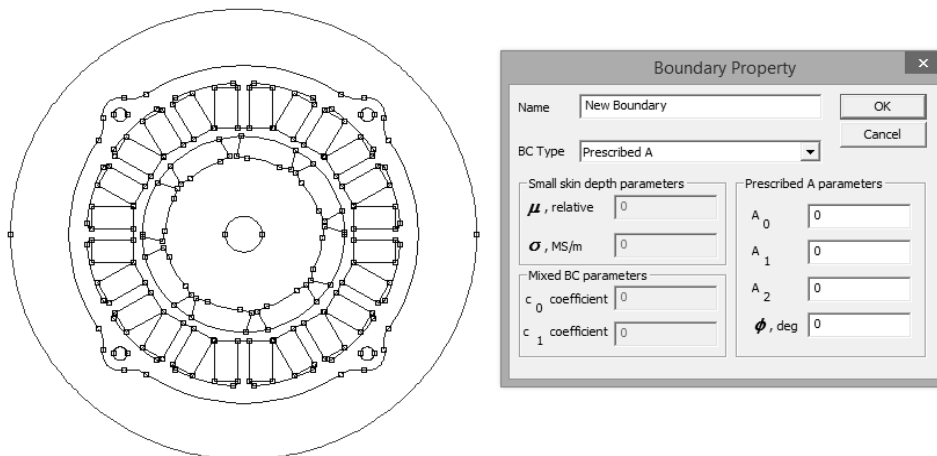
En la sección de “File” se selecciona la opción importar dxf, con lo que se importa el archivo del motor. Una vez que se tenga la geometría en el programa, se determina la distancia de desfase de la figura con el origen del programa y se alinean.

Después de alinear el origen de la figura con el origen del programa se definen las características del problema, en pestaña “problem” se podrá definir las unidades en las que se trabajará y el tipo de problema y la profundidad de la geometría. Ver figura 5.5.



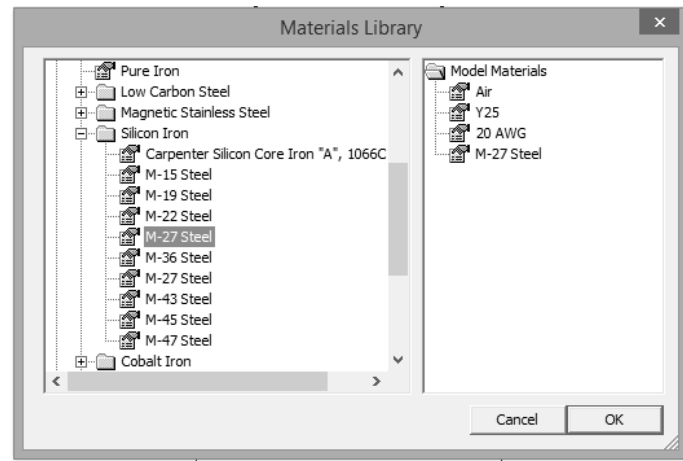
*Figura 5.5. Definiendo el problema.*

Ya que se tiene definidos los parámetros para el problema, se crean los límites para el análisis de la geometría, esto se hace dibujando un círculo alrededor de la figura y definirlo como límite. Ver figura 5.6.




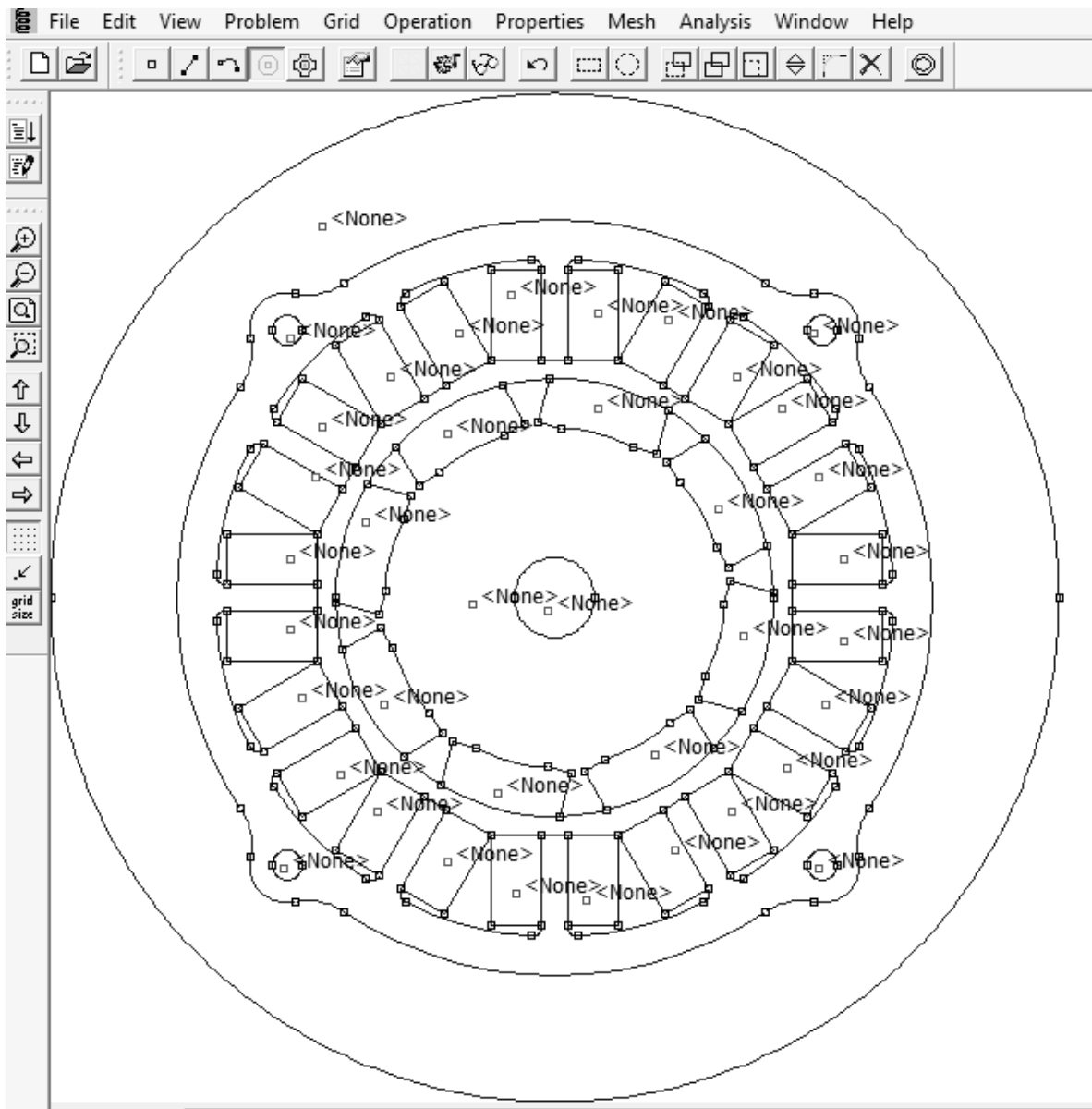
*Figura 5.6. Definiendo límites del análisis.*

Ya que se tienen definidos los límites del problema, se definen los materiales a utilizar, en la pestaña “propiedades >> materials library” encontraremos una amplia lista de materiales y los que serán utilizados los colocamos en la carpeta “model materials”. Ver figura 5.7.



*Figura 5.7. Selección de materiales a utilizar.*

Ya que fueron definidos los materiales que se utilizarán, deben ser asignados a alguna parte de la figura del problema, para esto con el botón “block (  )” se colocan etiquetas en todas las áreas dentro del límite para posteriormente asignarles un material.



*Figura 5.8. Definiendo propiedades de las geometrías.*

Para definir el material correspondiente, se pulsa el botón derecho para abrir una ventana en la que se definen las características del material. Ver figura 5.8.

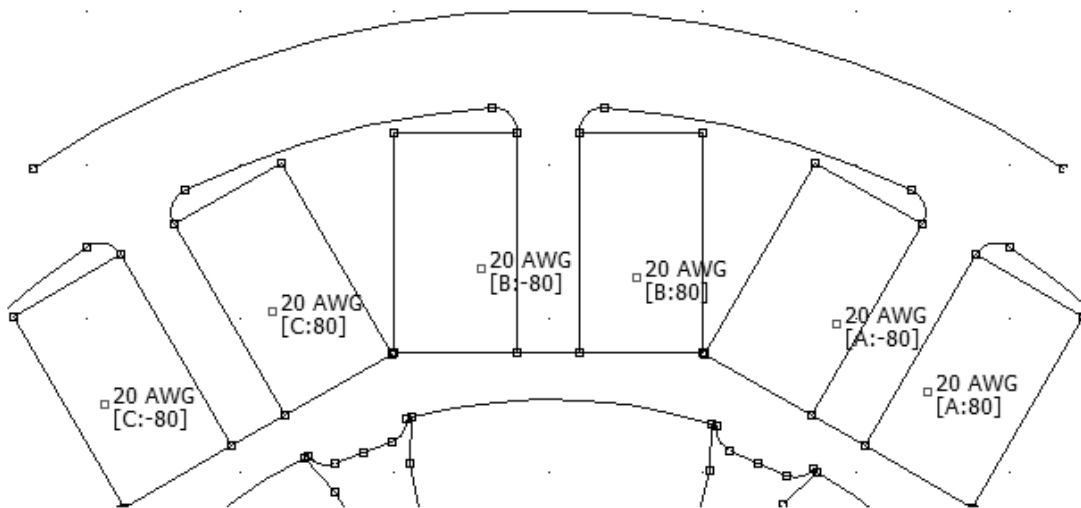
Para los casos de las bobinas y los imanes hace falta realizar un proceso un poco más complejo.

Para las bobinas, con el botón derecho se selecciona el material que, en este caso, será alambre de cobre calibre 20.

Para poder definir el sentido de las bobinas primero se tienen que definir los circuitos que se utilizarán.

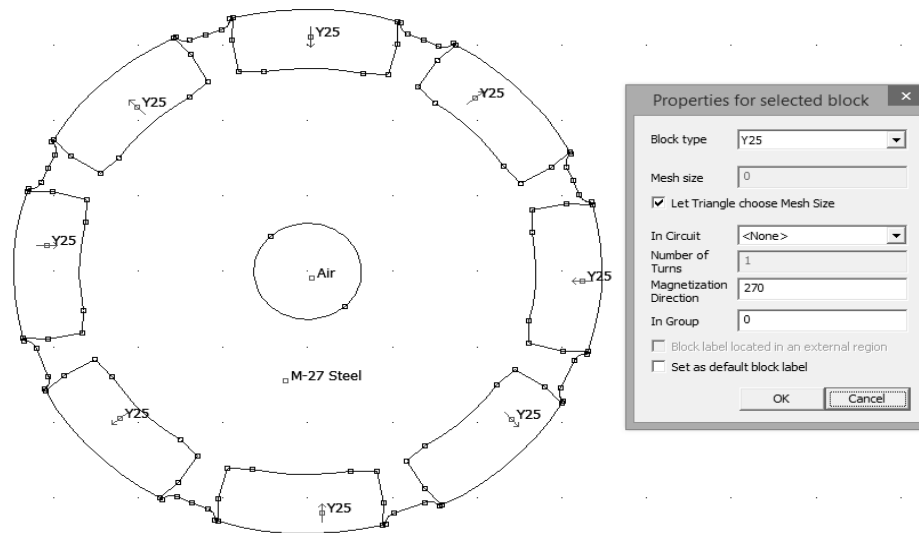
Al ser un motor trifásico de señal cuadrada se definirán 3 circuitos, en la pestaña “problem >> circuits” se definen los circuitos A, B, C. Una vez que se han definido los circuitos ya es posible definir las bobinas. Cada una de las bobinas de una fase se define simétricamente con respecto a las otras fases.

Cada bobina está conformada por dos partes una de ella representa los conductores que entran y la otra los conductores que salen para definir qué lado es cada uno se pulsa el botón derecho en uno de los dos lados de la bobina y se selecciona un circuito, después se agrega el número de vueltas y se pone signo negativo si los conductores entran a la pantalla y signo positivo si los conductores salen de la pantalla, como se muestra en la figura 5.9 observando que al alimentar los conductores el campo magnético tendrá dirección hacia el interior del motor respetando la regla de la mano derecha.




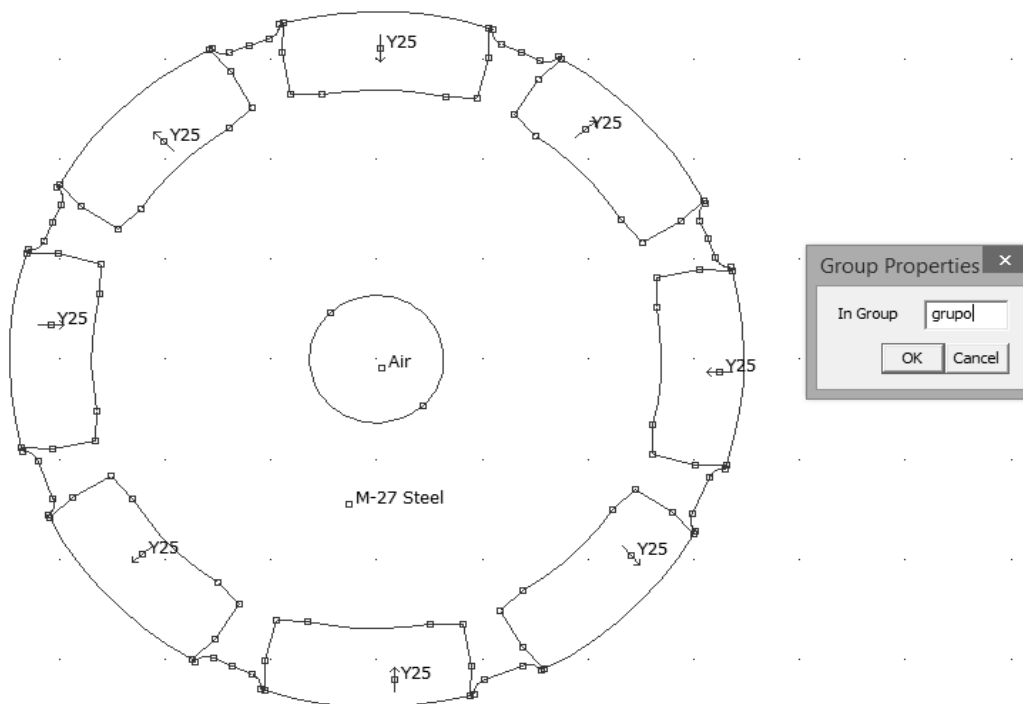
*Figura 5.9. Definiendo dirección de devanados en estator.*

En el caso del rotor al ser de polaridades invertidas es necesario designar a cada imán la dirección de polarización, indicando un polo norte hacia afuera del rotor y un polo sur hacia el centro del rotor. Ver figura 5.10.



*Figura 5.10. Definiendo propiedades de los imanes permanentes en el rotor.*

Para poder tener control sobre el rotor y cambiarlo de posición es necesario asignarlo como un solo grupo, para ello se selecciona el botón “grupo (  )” y posterior a eso se utiliza la herramienta para seleccionar, se marca todo el rotor y con la tecla espacio se accede a un menú donde se define el nombre del grupo. Ver figura 5.11.

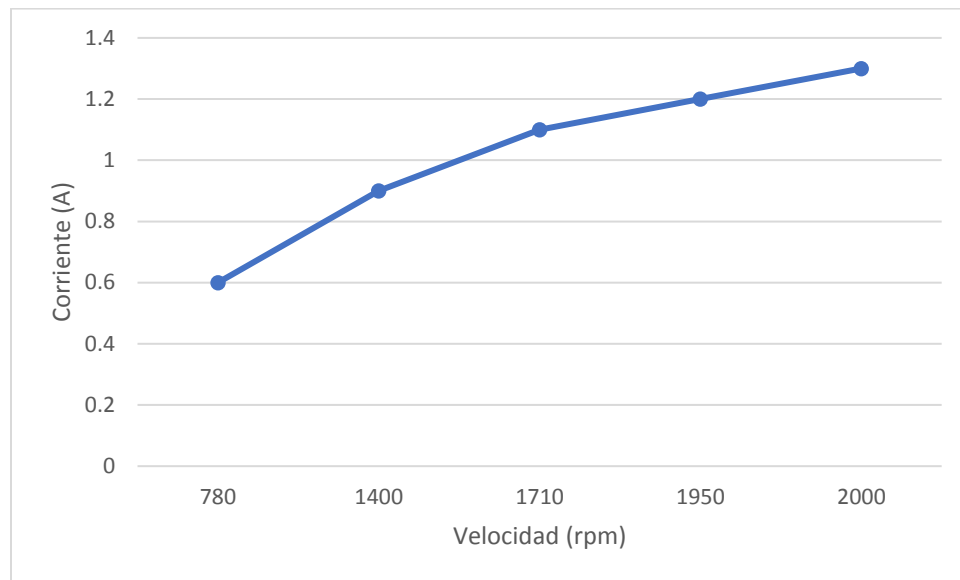


*Figura 5.11. Definiendo al rotor como un grupo.*



### 5.3. Pruebas sin carga

Basándose en los datos de la tabla 5.2, es posible realizar una gráfica que exprese los resultados el comportamiento sin carga. Ver figura 5.12.

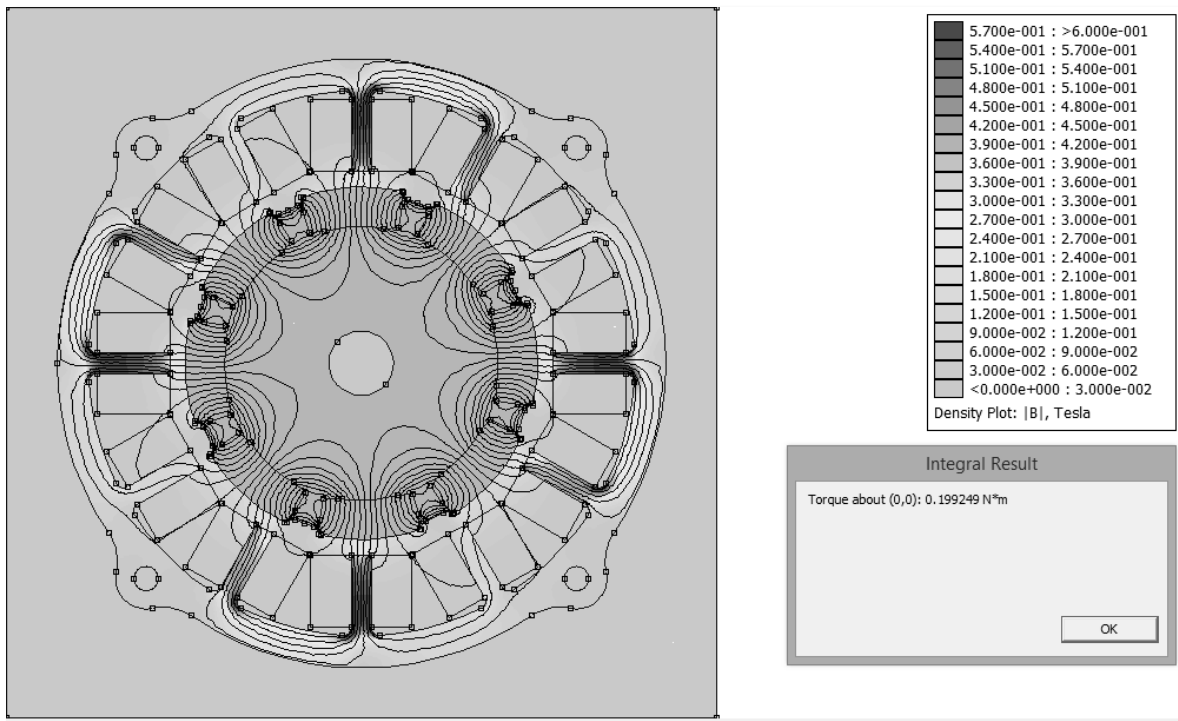


*Figura 5.12. Comportamiento sin carga.*

Considerando los datos de la gráfica, es posible calcular una aproximación del torque que se estaba generando. En el momento que llegó a su velocidad máxima 2000 rpm la corriente consumida fue de 1.3 Amp, lo que da una potencia de 39.9W. Considerando la potencia y las revoluciones arroja un par-motor de 0.1427N\*m.

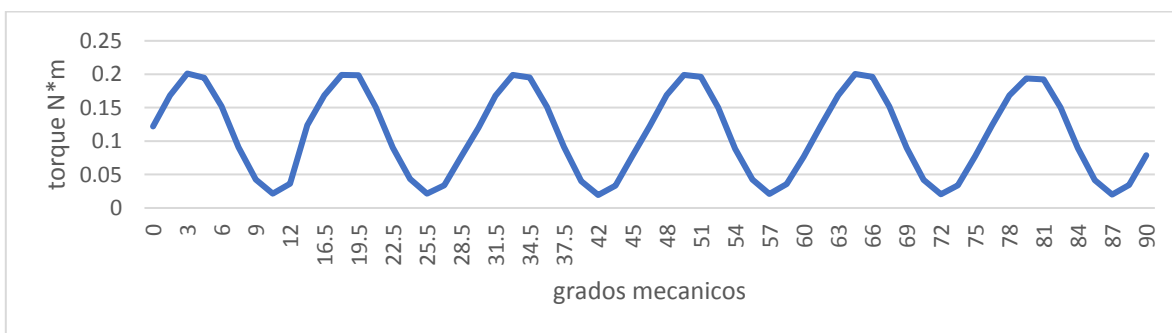
Para comparar este resultado con el análisis en el software FEMM, es necesario calcular cuál es la fuerza magnetomotriz en cada una de las bobinas del estator, para esto se tomará la corriente que se midió en la prueba sin carga y se dividirá en los 4 lazos de corriente que recorren las 8 bobinas que están activadas lo que arroja una corriente de 0.325Amp y cuando esta corriente circula por las 80 vueltas de las bobinas genera una fuerza magnetomotriz de 26 Av.

Esta corriente de 0.325Amp será introducida en el programa FEMM, el sentido de la corriente será determinado por la posición del rotor en ese instante. Ver figura 5.13.



*Figura 5.13. Análisis de torque sin carga en un instante FEMM.*

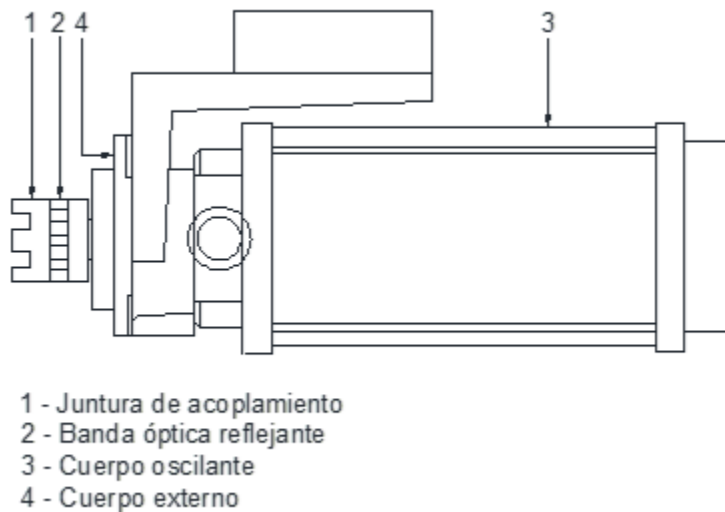
Los resultados de analizar el torque producido por el motor en diferentes posiciones del rotor arrojan la gráfica de la figura 5.14. que muestra fluctuaciones en el torque de salida, esto es debido al tipo de conmutación, y como ya se había mencionado y se puede observar, con el control por conmutación trapezoidal controlar un este motor a bajas velocidades resultara muy complicado.



*Figura 5.14. Comportamiento de torque sin carga.*

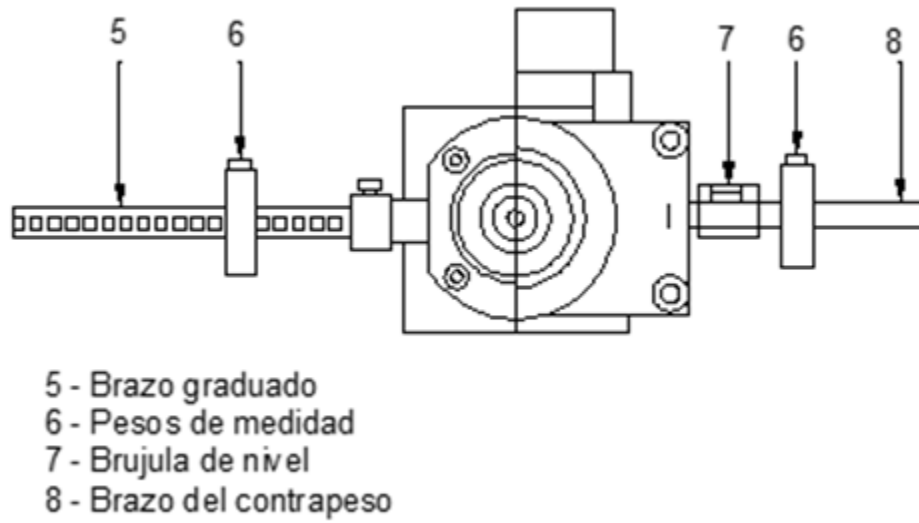
## 5.4. Pruebas con carga

Para realizarle pruebas de funcionamiento al motor se utilizó un freno magnético de la marca DE LORENZO DL10300A mostrado en la figura 5.15, que por medio de una junta se acoplo con el motor.



*Figura 5.15. Freno electromagnético DL 10300A.*

El procedimiento para realizar las mediciones consiste en montar en el freno electromagnético dos barras a los costados de este, una de las barras tiene un nivel de burbuja que sirve para nivelar la máquina, la segunda barra es graduada para realizar las mediciones.



*Figura 5.16. Elemento de nivelación para DL 10300A.*

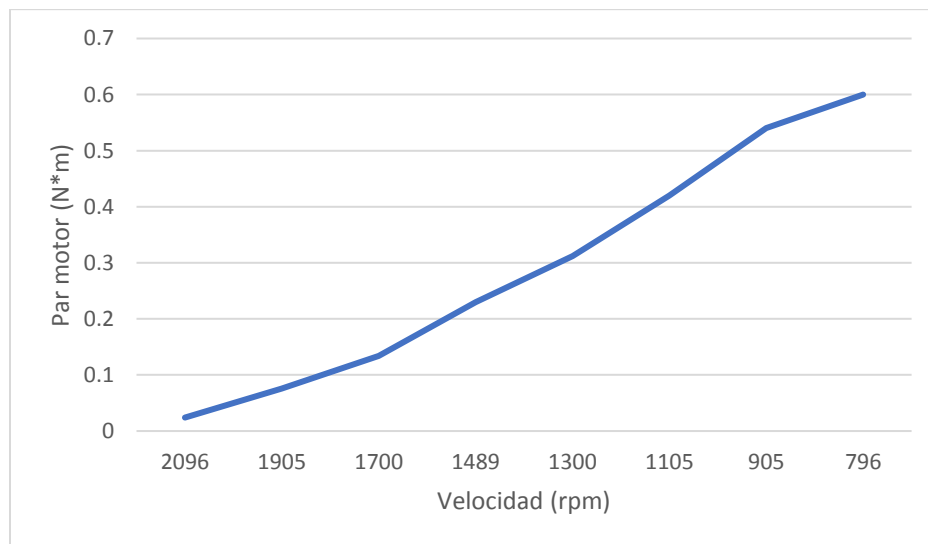
Con el equipo nivelado se colocan dos pesos en el principio de las barras como se muestra en la figura 5.16, después en la barra graduada se coloca una pesa más de 2N inmediatamente después de la primera pesa (al inicio de la graduación). Después de estos se conecta el freno electromagnético al equipo de medición DL 10050 y se enciende el motor BLDC. Sin excitar las terminales del freno electromagnético calibramos el equipo de medición, moviendo la pesa de la barra con el nivel hasta que en el equipo de medición marque 0 N\*m, esto indica que en ese instante el motor está trabajando sin carga. Para aplicarle la carga se aumenta gradualmente la excitación en las terminales de freno electromagnético y se mantiene una medición constante de rpm en el motor, cuando el motor haya disminuido 200 rpm a partir de su estado sin carga se mueve uno de los pesos de la barra graduada hasta que el equipo de medición marque 0 N\*m. En este momento se toma la lectura de la distancia que se desplazó el peso de 2N y con esos valores se calcula el torque que se produjo. Para continuar con las mediciones se repite el procedimiento en intervalo de 200 rpm.

Los resultados obtenidos de esta técnica se muestran en la tabla 5.3.

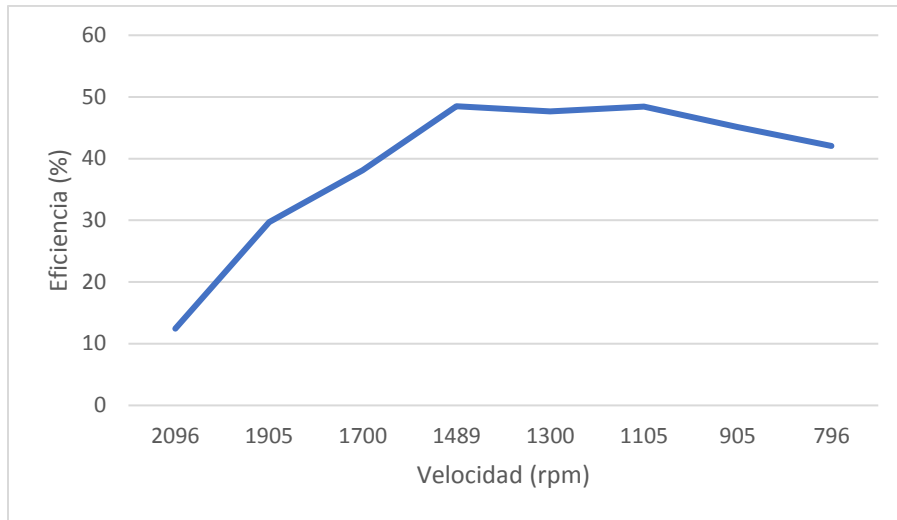
*Tabla 5.3. Resultados de prueba con carga.*

# Medición	Parámetros eléctricos			Parámetros mecánicos			
	Voltaje (v)	Corriente (A)	Potencia eléctrica (W)	rpm	N*m	potencia mecánica (W)	Eficiencia (%)
1	24.9	1.7	42.33	2096	0.024	5.265229223	12.4385288
2	24.3	2.1	51.03	1905	0.076	15.15386226	29.6959872
3	23.6	2.65	62.54	1700	0.134	23.84341637	38.1250661
4	23.1	3.2	73.92	1489	0.23	35.84571907	48.4925853
5	22.56	3.95	89.112	1300	0.312	42.45342265	47.6405228
6	21.8	4.6	100.28	1105	0.42	48.57651246	48.440878
7	21	5.4	113.4	905	0.54	51.15135022	45.1070108
8	20.5	5.8	118.9	796	0.6	49.98953318	42.0433416

Para apreciar mejor el comportamiento del motor, basándose en la tabla 5.3, se realizaron las siguientes graficas que muestran la relación par vs velocidad del motor figura 5.17, así como la eficiencia del motor en diferentes cargas figura 5.18.



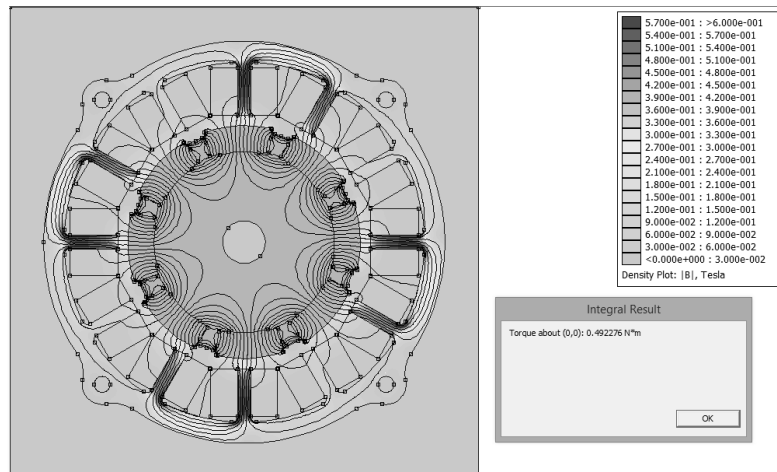
*Figura 5.17. Comportamiento Par vs velocidad.*



*Figura 5.18. Curva de eficiencia del motor.*

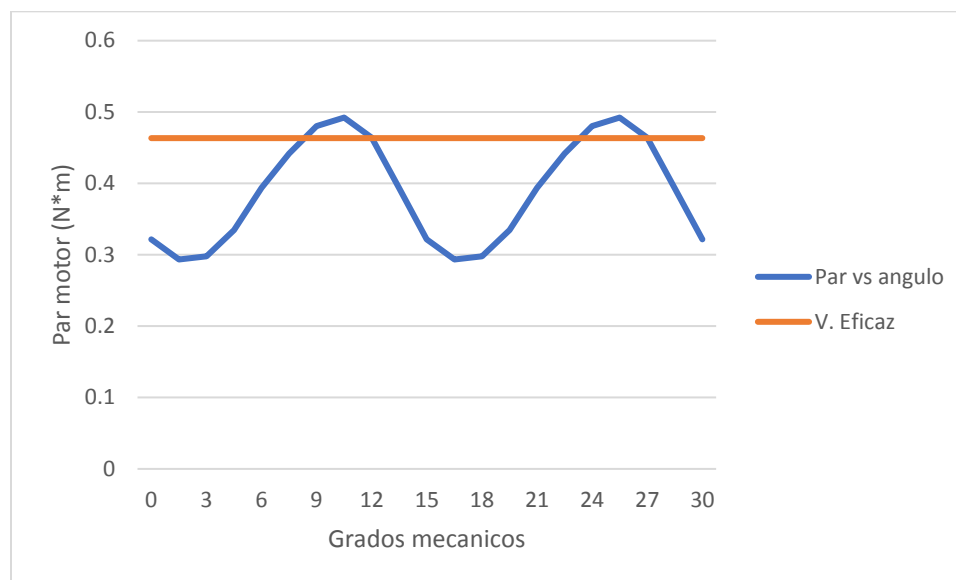
Para realizar una comparación de los resultados obtenidos con las mediciones, se utilizará el software FEMM. La medición que será comparada contra el programa FEMM será la medición número 6 que esta resaltada en la tabla 5.3, se tomara esta medición ya que es donde se generó mayor potencia conservando la eficiencia máxima.

De la medición número 6 se toma la corriente y se divide entre las 4 trayectorias del motor, esto da una corriente de 1.15 Amp por cada trayectoria, este el valor que se introducirá en los devanados en el programa FEMM, la polaridad será determinada dependiendo de la posición del rotor. Ver figura 5.19.



*Figura 5.19. Análisis de torque con carga por FEMM.*

Realizando este procedimiento y siguiendo la secuencia de rotación del rotor se puede definir una curva de comportamiento del par motor como lo muestra la figura 5.20.



*Figura 5.20. Par motor con respecto al ángulo y valor eficaz.*

El valor eficaz del par en este caso es de 0.46342 N\*m contra los 0.42 N\*m que se midieron en el mismo caso, la razón de la diferencia entre estos dos valores es a consecuencia de que el software no toma en cuenta factores de fabricación, así como la condición del núcleo y los devanados.

## 6. Conclusiones

Para fabricar un motor BLDC es necesario considerar la aplicación que tendrá, de esto dependerá la estructura del estator y del rotor, como en este caso la aplicación fue para el sistema de propulsión de un vehículo eléctrico ligero se fabricó un motor con 12 polos en el estator y 8 en el rotor, el proceso de manufactura de los núcleos fue con cortadores, al realizar este método se observaron diferentes problemas, como lo son la falta de precisión en los cortes, y el desgaste prematuro de la herramienta por las propiedades abrasivas del propio acero, pero al final con algunos acondicionamiento finales se logró fabricar el motor.

En el caso del controlador, se fabricó un controlador basado en conmutación trapezoidal, el cual consiste en 6 MOSFET de potencia los cuales son controlados por arduino. A la hora de fabricar controladores, podría ser muy simple solamente diseñar el circuito de excitación de los MOSFET, pero siempre es importante considerar las protecciones, un aislamiento eléctrico entre cada una de las etapas protegerá el microcontrolador de una falla en la etapa de potencia.

Al igual que muchos motores al funcionar sin carga el motor presenta una baja eficiencia y altas revoluciones, pero al aumentar la carga se logra llegar a un intervalo de mayor eficiencia y en ese intervalo se presenta la mayor potencia desarrollada por el motor, al sobrecargar el motor los rpm disminuyen y se presenta un problema con el controlador, debido a su naturaleza, al ser conmutación trapezoidal a bajas velocidades se comienza a notar los pulsos en el par motor. La eficiencia máxima del motor fue de 48 %, lo que es bastante bajo para un motor eléctrico y mucho más baja que un motor de este tipo, la baja eficiencia es debida en parte al proceso de manufactura que, aunque se acondicionaron las láminas dejo imperfecciones en los núcleos aumentando las perdidas, aunque uno de los factores que más afectaron las perdidas fue que el entrehierro fue de alrededor de 3mm.

Es recomendable para lograr eficiencias superiores cambiar el proceso de manufactura, utilizar un troquel o corte por láser como se hace a nivel industrial mejoraría bastante el rendimiento del motor, además de fabricar el estator y el rotor en partes separadas para evitar problemas de aumento de entrehierro. Otro factor por mejorar es diseñar otro rotor con imanes de neodimio, lo que aumentara la densidad



de potencia del motor. Por último, para mejorar el par de salida es buena idea trabajar en un control más avanzado, aunque esto dependerá de la aplicación que se le quiera dar.

## 7. Bibliografía.

- [1].Melissa Garcia Ruiz. (2015). Pasado, presente y futuro de los vehiculos electricos. Colombia: Universidad Tecnologica de Pereira.
- [2].Ambarish Kulkarni, Ajay Kapoor, Mehhran Ektesabi and Howard Lovatt. (2012). Electric Vehicle Propulsion System Desing.: Automotive Technologies.
- [3].Manuele Bertoluzzo, Giuseppe Buja. (2010). Propulsion systems for lighth electric vehicles.: IEEE International Symposium on Industrial Electronics.
- [4].Dagoberto Silva Franco. (2012). “LAMINACION EN CALIENTE Y EN FRIO DE ACEROS AL SILICIO PARA APLICACIONES ELECTRICAS” (tesis de maestria). Universidad Autónoma de Nuevo Leon.
- [5].Eléctrical Steel Sheets. JFE Steel corporation.
- [6].T.J.E. Miller. (1989). Brushless Permanet-Magnet and Reluctance Motor Drivers. OXFORD: Clarendon press.
- [7].Dr. Duane Hanselman. (2003). Brushless Permanent Magnet Motor Design. University of Maine: Magna physics publishing.
- [8].Wei Tong. (2014). Mechanical desing of electric motors. Parkway NW: CRC press.
- [9].Roger Juanpere Tolra. Tecnicas de control para motores brushless comparativa entre conmutacion trapezoidal, conmutacion sinusoidal y control vectorial. Barcelona, España: Ingenia-cat Motion Control Department.
- [10]. P. Bastian, W. Eichler, F. Huber, N.Jaufmann, J. Manderla, O. Spielvogel, G. Springer, F.D. Stricker, K Tkotz. (1996). Fachkunde elektrotechnik. Alemania: Akal education.
- [11]. Roberto Martin Murdocca. Sensores de efecto Hall. Argentina: Universidad Nacional de San Luiz.
- [12]. David Meeker. “Finite Element Method Magnetics Version 4.2 User’s Manual” 2015.