



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA  
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES  
CARRERA INGENIERÍA ELECTRÓNICA

PROYECTO INTEGRADOR PARA LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE GRADO INGENIERO ELECTRÓNICO

**“MINI PROTOTIPO SILLAS DE RUEDAS CON MOTORES  
BRUSHLESS DE FLUJO AXIAL- SUPERVISION Y  
CONTROL”**

Alumno  
Gallini, Juan Ignacio

Director  
Esp.Ing. Agüero, Adrián

Córdoba, República Argentina

Diciembre - 2018





**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA**

***Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y  
Naturales***

***Escuela de Ingeniería Electrónica***

El Tribunal Evaluador reunido en éste acto y luego de haber aprobado la Solicitud de Aprobación de Tema y efectuado las distintas instancias de correcciones del Informe del Proyecto Integrador para la obtención del Título de Grado “Ingeniero Electrónico” y cumpliendo con el Reglamento correspondiente, declaran el Informe Final de/l los estudiante/s: **Gallini, Juan Ignacio** como “aceptado sin correcciones” y la defensa oral Aprobada. Por lo tanto, luego de haber tenido en cuenta los aspectos de evaluación que indica el Reglamento, el Proyecto Integrador se considera Aprobado.

Se firma el Acta de Examen correspondiente y se distribuyen los ejemplares impresos.

NOTA:

Firma y aclaración del Tribunal Evaluador

Fecha:



***UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA***

***Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y  
Naturales***

***Escuela de Ingeniería Electrónica***

Quien suscribe el Profesor Esp.Ing Agüero Adrián en su carácter de Director del Proyecto Integrador del Estudiante Gallini, Juan Ignacio, denominado: “Mini prototipo sillas de ruedas con motor brushless de flujo axial- Supervisión y control”. considera que el desarrollo del trabajo se ha completado según lo especificado en la Solicitud de Aprobación de Tema y se encuentra en condiciones de tramitar su defensa.

A los efectos de quién corresponda, en fecha ...../...../.....

Firma y aclaración del Director

## **Dedicatoria**

Dedico esta tesis a mis padres por su apoyo incondicional.

A Gianfi, un amigo muy especial, con el que compartí gran parte de la carrera, que aunque no esté entre nosotros siempre estará muy presente.

## **Agradecimientos**

Agradezco a mis padres, a mis hermanas, a Yami, a mi familia por acompañarme y apoyarme para lograr este objetivo.

A mis amigos con los que compartí estos años.

Al director del proyecto Ing. Agüero.

## **Resumen**

En este proyecto final se ha desarrollado y diseñado un módulo para el manejo de dos motores brushless de flujo axial implementados en un prototipo de sillas de ruedas.

Este módulo está conformado básicamente por dos grandes bloques:

- a- El bloque de control encargado del procesamiento de las señales de los sensores hall de los motores, de la generación de la señal correspondiente para la activación de los mosfets y de establecer la comunicación bluetooth con el móvil.
  
- b- El bloque de potencia que está formado por un inversor trifásico que cuenta con los mosfets encargados de alimentar a los bobinados de los motores.

## **Área Temática y Asignaturas**

Área Temática: Industrial y control.

Asignaturas: Electrónica Industrial e Electrónica Industrial Avanzada, Sistemas de Control

## **Palabras Claves**

motor sin escobillas, flujo axial, sensor hall, modulación por ancho de pulso.

## **Abstract**

In this final project, a module for the control of two brushless axial-flux motors, implemented in a prototype of wheelchairs, has been designed and developed.

This module consists, basically, of two large blocks: the control block, responsible for the signals processing of the hall sensors of the motors, the generation of the corresponding signal for the activation of the mosfets, and to establish the bluetooth communication with the mobile; and the power block, which is composed of a three-phase inverter that has the mosfet responsible for feeding the windings of the motors.

## **Key Words**

motor brushless, axial flux, hall sensor, pulse width modulation

## Lista de Tablas

Tabla 3.1: Secuencia de conmutación, sentido horario .....	24
Tabla 3.2: Secuencia de conmutación, sentido anti-horario .....	24

## Lista de Figuras

Figura 1: Esquema del sistema.	2
Figura 2.1: Vista lateral Motor CC.	5
Figura 2.2: Alimentación del rotor del Motor CC.	6
Figura 2.3: Circulación de corriente en la armadura cuando se cortocircuitan las delgas.	7
Figura 2.4: Sentido de circulación de la corriente en la armadura después de un giro superior a $90^\circ$ .	8
Figura 2.5: Máquina de un solo lado estator ranurado.	10
Figura 2.6: Máquina de un solo lado estator sin ranura.	10
Figura 2.7: Máquinas de rotor interior con núcleo ferromagnético en el rotor.	11
Figura 2.8 Máquinas de rotor interior con rotor sin núcleo.	12
Figura 2.9: Máquina N-N con estator ranurado interior con arrollamiento.	13
Figura 2.10: Máquina N-N con estator r sin ranura interior con devanado toroidal.	13
Figura 2.11: Máquina N-S con estator interno de núcleo ferromagnético.	14
Figura 2.12: Máquina N-S estator sin núcleo interior.	14
Figura 2.13: Máquina de flujo axial de varias etapas con dos estatores y tres rotores.	15
Figura 3.1: Motor brushless de flujo axial.	16
Figura 3.2: Topología del rotor de un motor brushless de flujo axial.	17
Figura 3.3: Topología del estator de un motor brushless de flujo radial.	18
Figura 3.4: Fuerza contra electromotriz trapezoidal.	19
Figura 3.5: Fuerza contra electromotriz sinusoidal.	19
Figura 3.6: Sensores Hall.	20
Figura 3.7: Inversor o variador electrónico.	21
Figura 3.8: Tensión de fase, corriente y formas de onda Hall-Sensor con respecto al ángulo eléctrico del rotor.	22
Figura 3.9: Modo de excitación de los bobinados, conducción a $120^\circ$ .	23
Figura 3.10: Modelo eléctrico Motor Brushless.	25
Figura 3.11: Relación Torque vs Velocidad.	27

Figura 4.1: Grafico de selección de transistores de potencia.	31
Figura 4.2: Estructura del mosfet de acumulación canal n.	33
Figura 4.3: Polarización del mosfet de acumulación canal n.	33
Figura 4.4: Puente H trifásico.	35
Figura 4.5: Señales de sensores y $f_{cem}$ .	37
Figura 5.1: Módulos del sistema.	39
Figura 5.2: Vista frontal mini prototipo.	40
Figura 5.3: Vista trasera mini prototipo.	40
Figura 5.4: Plaqueta de alimentación.	41
Figura 5.5: Plaqueta de control.	42
Figura 5.6: Placa de programación puerto ICSP.	43
Figura 5.7: Plaqueta de Potencia.	44
Figura 5.8: Plaqueta de mediciones.	45
Figura 5.9: Motor brushless de flujo axial.	46
Figura 5.10: Estructura motor brushless sin escobillas de flujo axial.	46
Figura 5.11: Vista lateral y posterior del rotor.	47
Figura 5.12: Laminación ranurada de acero. Vista anterior.	49
Figura 5.13: Vista anterior y posterior de las bobinas del estator.	49
Figura 5.14: Sensor hall.	50
Figura 6.1: Microcontrolador PIC16F887A PDIP.	52
Figura 6.2: Diagrama de secuencia software.	54
Figura 6.3: Comunicación asíncrona.	56
Figura 6.4: Pin out modulo bluetooth HC-05.	57
Figura 6.5: Pantalla conexión con Módulo HC-05.	57
Figura 6.6: Pantalla principal "Bluetooth terminal HC-05".	58

Figura 7.1:Módulo de potencia.	60
Figura 7.2: Circuito de conexión 4N25.	61
Figura 7.3: Gráfica polarización led del opto-acoplador.	62
Figura 7.4: Configuración push-pull mosfet de canal N.	63
Figura 7.5: Diagrama driver IR2110.	64
Figura 7.6: Circuito carga del capacitor $C_{BOOT}$ .	65
Figura 7.7: Grafica $V_{GS}$ vs $Q_g$ .	66
Figura 7.8: IR2110.	67
Figura 7.9: Mosfet IRF630.	68
Figura 7.10: Topología inversor conducción $120^\circ$ .	71
Figura 7.11: Topología inversor conducción $120^\circ$ .	71
Figura 8.1: Prototipo final.	73
Figura 8.2: Base de apoyo para realizar mediciones.	74
Figura 8.3: Señal sensores hall.	75
Figura 8.4: Tensión entre las fases del motor.	75
Figura 8.5: Tensión PWM aplicada a los mosfets.	76

## Lista de Símbolos y Convenciones

BLDC: Motor de corriente continua sin escobillas

PWM: Modulación por ancho de pulso.

BEMF: Fuerza contra electromotriz.

RPM: Revoluciones por minuto

Kv: constante del motor.

Kt: constante de torque del motor.

T: torque

I: corriente

# Índice

<b>Capítulo 1- Introducción.....</b>	<b>1</b>
Objetivos Generales.....	3
Objetivos Específicos.....	3
Motivación.....	3
Metodología para lograr los objetivos .....	4
Orientación al lector de la organización del texto.....	4
<b>Capítulo 2- Motores de corriente Continua .....</b>	<b>5</b>
Motor de Corriente continua .....	5
Motor sin escobillas .....	8
Motor de flujo axial.....	8
<b>Capítulo 3 - Motores brushless de flujo axial.....</b>	<b>16</b>
Estructura de un motor brushless de flujo axial .....	16
Teoría de funcionamiento.....	20
Modelo eléctrico del motor brushless .....	25
Modulación por ancho de pulso (PWM) .....	26
Motor BLDC vs Motor CC .....	27
Motores utilizados en el proyecto .....	28
<b>Capítulo 4 – Inversor.....</b>	<b>30</b>
Transistores de potencia .....	30
MOSFET .....	32
Topología del inversor.....	34
Principio de funcionamiento del inversor .....	35
<b>Capítulo 5 - Desarrollo del sistema .....</b>	<b>38</b>
Diseño de la estructura .....	39
Circuitos impresos.....	41
Motores utilizados en el proyecto.....	45
<b>Capítulo 6 - Desarrollo del módulo de control .....</b>	<b>51</b>
Microcontrolador .....	51
Software implementado en PIC16F887A .....	53
Comunicación bluetooth .....	55
Sensor de corriente.....	58

<b>7. Diseño del circuito de potencia .....</b>	<b>60</b>
Aislación galvánica.....	60
Driver de activación de mosfet .....	63
Inversor.....	70
<b>8. Descripción del modelo experimental .....</b>	<b>73</b>
<b>Conclusiones.....</b>	<b>78</b>
Bibliografía.....	79
Referencias.....	80
Anexo I- Layout placa de control.....	82
Anexo II- Layout placa de potencia.....	85
Anexo III- Layout placa de alimentación.....	88
Anexo IV- Layout placa de mediciones.....	91
Anexos del Proyecto Integrador .....	94

## Capítulo 1- Introducción

La realización del Proyecto Final tiene como objetivo principal brindar a las Cátedras de Electrónica Industrial, Electrónica Industrial Avanzada y Sistema de Control, una importante herramienta para conocer el funcionamiento de los Motores Brushless de flujo axial, mediante la implementación de estos en un mini prototipo de silla de ruedas, el cual nos permite visualizar de forma didáctica los parámetros y respuestas del sistema de control de los respectivos motores.

Los Motores Brushless de flujo axial son motores de corriente continua. En estos motores la conmutación se realiza de manera electrónica evitando las pérdidas por rozamiento que genera la conmutación mecánica. A diferencia de los motores radiales, en los de flujo axial el entrehierro está a lo largo de la máquina debido a que el estator y el rotor tienen forma de discos. Esto hace que tengan una corta longitud axial resultando muy compactos y con una excelente relación torque / peso, ideales para aplicarlos en sillas de ruedas.

Si bien el objetivo principal del proyecto no fue el diseño de una silla de ruedas resulto interesante observar las cualidades de estos motores en esta aplicación ya que se están utilizando cada vez más para la propulsión y el transporte, surgiendo una nueva alternativa respecto a los motores CC utilizados en las sillas que se comercializan en la actualidad.

El sistema está conformado básicamente por dos grandes módulos, el módulo de control y el módulo de potencia, como se visualiza a continuación.

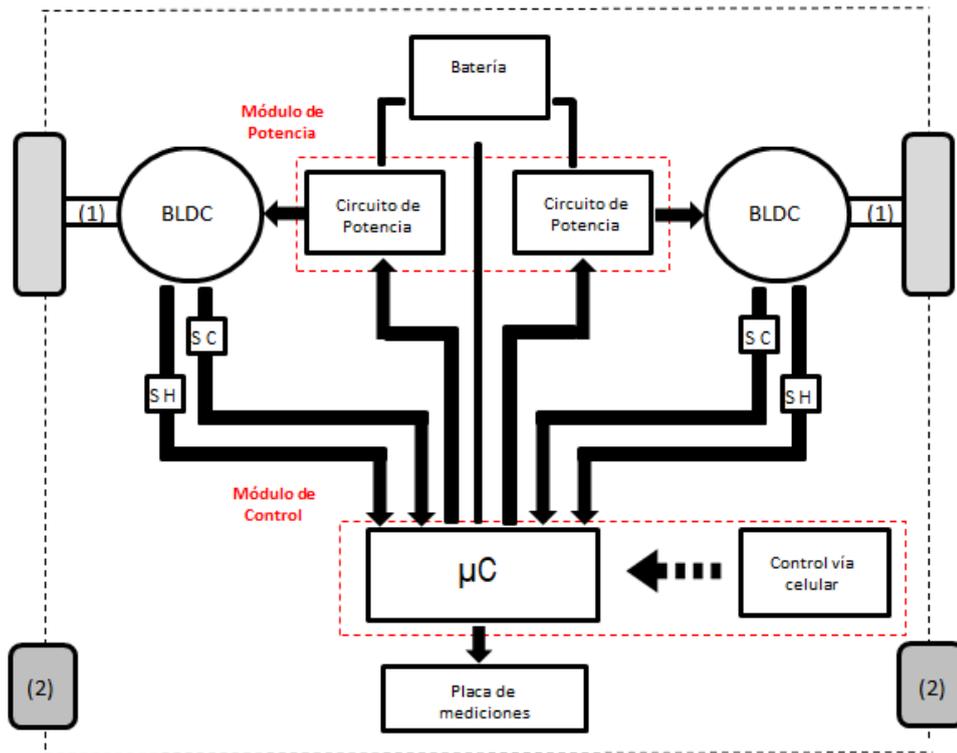


Figura 1: Esquema del sistema

BLDC: Motor de corriente continua sin escobillas

SH: Sensores hall (tres por cada motor)

SC: Sensores de corriente

(1) Caja reductora

(2) Rueda pivotante

El módulo de control está conformado por un microcontrolador PIC 16F887A encargado de interpretar las señales provenientes de los sensores de posición del motor (Sensores Hall), de sensar la corriente que circula por los motores y además tiene la función de establecer la comunicación bluetooth con el celular.

El módulo de potencia está compuesto por el inversor y por una etapa de aislación galvánica. Este es el encargado de llevar adelante la conmutación electrónica.

## **1.1 Objetivos Generales**

El objetivo de este proyecto es armar un kit educativo para las Cátedra de Electrónica Industrial, Electrónica Industrial de Avanzada y Sistema de Control para comprender el funcionamiento de los Motores brushless de flujo axial y de su sistema de excitación aplicándolos en un mini prototipo de sillas de ruedas para poder comparar el funcionamiento de estos con otro tipo de motores.

## **1.2 Objetivos Específicos**

- Estudiar el principio de funcionamiento de un Motor Brushless de flujo axial.
- Analizar el funcionamiento del sistema de accionamiento de Motores Brushless de flujo axial mediante la técnica de Modulación por ancho de pulso (PWM).
- Implementar sistema de accionamiento de los Motores Brushless utilizando un microcontrolador PIC.
- Establecer una comunicación entre el microcontrolador y un teléfono celular utilizando la tecnología bluetooth.
- Construir una placa en la cual se puedan llevar adelante distintas mediciones del sistema.
- Observar las cualidades de los motores en el prototipo de sillas de ruedas.

## **1.3 Motivación**

La idea del proyecto es seguir aportando material a la Cátedra de Electrónica Industrial, Electrónica Industrial de Avanzada y Sistema de Control sobre los Motores brushless de flujo axial. Teniendo en cuenta las características técnicas de estos motores para impulsar y ser aplicados en medio de transporte, se decidió aplicarlo a un mini prototipo de sillas de ruedas.

## 1.4 Metodología para lograr los objetivos

Para llevar adelante el proyecto se comenzó por la lectura de bibliografía del área de potencia y de control, para comprender el funcionamiento de los motores brushless de flujo axial.

Luego se llevaron adelante los cálculos de los diferentes componentes de los circuitos y mediante el software Proteus se simularon y diseñaron dichos circuitos de potencia y de control.

Los circuitos fueron construidos mediante la técnica de transferencia por calor utilizando papel termo sensible.

En forma paralela se llevó adelante el armado del segundo motor y de la estructura del mini prototipo de sillas de ruedas.

Las pruebas y puesta a punto se realizaron en el pañol de electrónica

## 1.5 Orientación al lector de la organización del texto

- **Introducción:** Capítulo 1
- **Marco teórico:** Capítulo 2- Motor de corriente continua.  
Capítulo 3- Motor brushless de flujo axial.  
Capítulo 4- Inversor trifásico.
- **Marco metodológico:** Capítulo 5- Desarrollo del sistema.  
Capítulo 6- Diseño circuito de control.  
Capítulo 7- Diseño circuito de potencia.
- **Conclusión**
- **Anexos**
- **Bibliografía**

# MARCO TEÓRICO

## Capítulo 2- Motores de corriente Continua

### 2.1 Motor de Corriente continúa

El motor de corriente continua también denominado motor de corriente directa o motor CC, es una máquina que convierte energía eléctrica en mecánica, provocando un movimiento rotatorio, gracias a la acción de un campo magnético.

Está compuesto principalmente por dos partes, el estator que contiene los polos de la máquina que pueden ser devanados de cobre sobre un núcleo de hierro o imanes permanentes. Y el rotor de forma cilíndrica, devanado y con núcleo, alimentado con corriente directa a través de las delgas del colector, que están en contacto alternante con las escobillas (Figura 2.1).

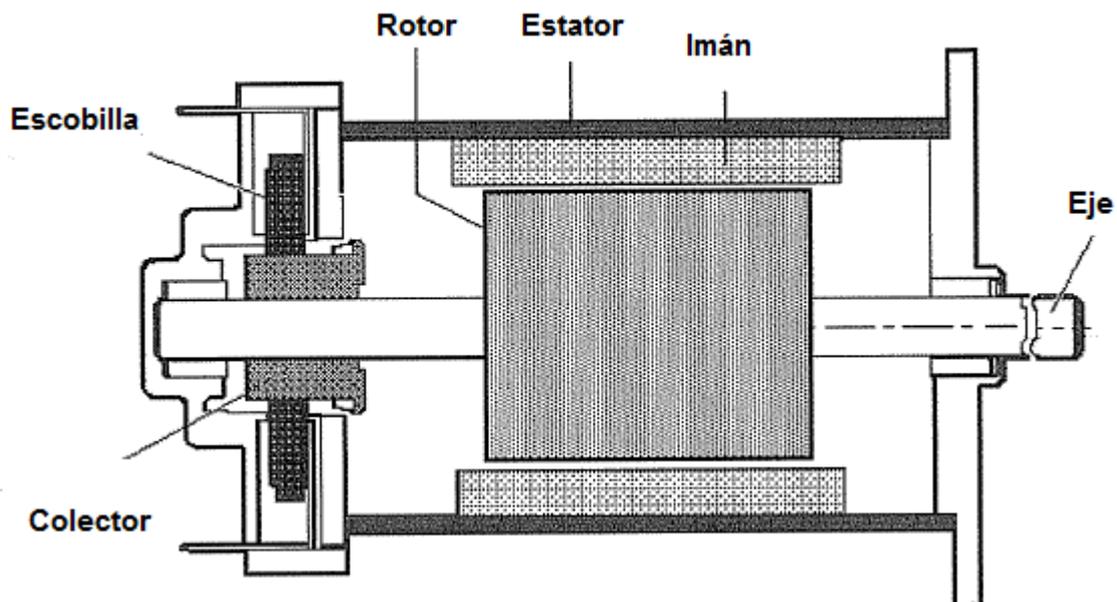


Figura 2.1: Vista lateral Motor CC.

Fuente: ([3] Stephen J. Chapman, "Maquinas Eléctricas")

A modo de simplificación para explicar el funcionamiento, tomaremos un rotor con dos conductores.

En el estator se origina el campo de excitación principal, el cual se representaremos por el flujo magnético. La alimentación del rotor se efectúa con corriente continua, manteniendo la polaridad de la máquina, tal como se muestra en la Figura 2.2.

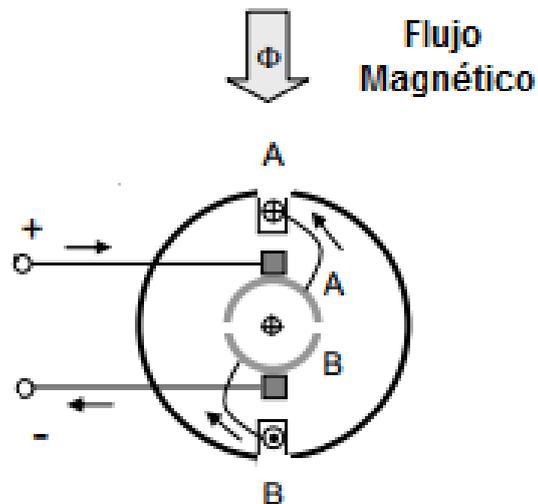


Figura 2.2: Alimentación del rotor del Motor CC.

Fuente: ([4] Muhammad H. Rashid, "Electrónica de Potencia")

En la posición del rotor mostrada, la corriente a la armadura entra por el borne positivo de la máquina, haciendo el recorrido indicado por las flechas. De acuerdo al sentido de la corriente en cada conductor y dado que los mismos están en presencia del campo magnético originado por el estator, sobre ellos aparecen fuerzas que producen una cupla y hacen girar al motor en sentido anti-horario. Luego de un giro de 90°, los carbones cortocircuitan las delgas, por lo que la corriente de alimentación se cierra a través de las mismas, tal como se muestra en la figura 2.3.

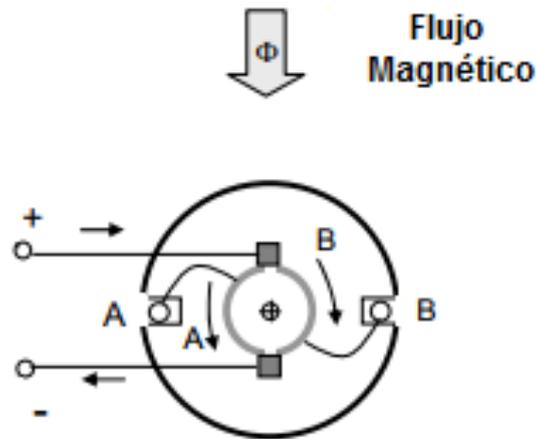


Figura 2.3: Circulación de corriente en la armadura cuando se cortocircuitan las delgas.

Fuente: ([4] Muhammad H. Rashid, "Electrónica de Potencia")

En este instante la corriente no circula por la espira, lo cual trae aparejado que no originen fuerzas, pero la máquina sigue girando ya que tiene otros conductores que como se mencionó anteriormente no se han colocado para simplificar el estudio.

Al seguir girando la máquina, la corriente en los conductores del rotor invierte su sentido de circulación de forma tal que siguen aportando cupla en el mismo sentido, tal como se muestra en la figura 2.4.

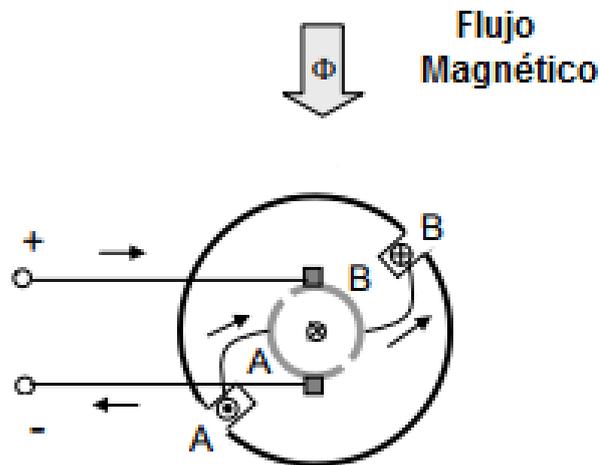


Figura 2.4: Sentido de circulación de la corriente en la armadura después de un giro superior a 90°.

Fuente: ([4] Muhammad H. Rashid, “Electrónica de Potencia”)

En el motor, también por el hecho de tener los conductores del rotor, girando en presencia de un campo magnético, se induce en los mismos una fuerza electromotriz, que en este caso se llama fuerza contra electromotriz.

## 2.2 Motor sin escobillas

Los motores sin escobillas, también conocidos como motores conmutados electrónicamente, son motores eléctricos alimentados por corriente directa y con sistemas de conmutación electrónica, en lugar de utilizar conmutadores mecánicos conformados por colectores y escobillas.

La ventaja más importante respecto a los motores CC convencionales es que al hacer la conmutación de forma electrónica se evita el rozamiento, la generación de calor y ruido que disminuyen el rendimiento y hacen que el motor requiera de mayor mantenimiento.

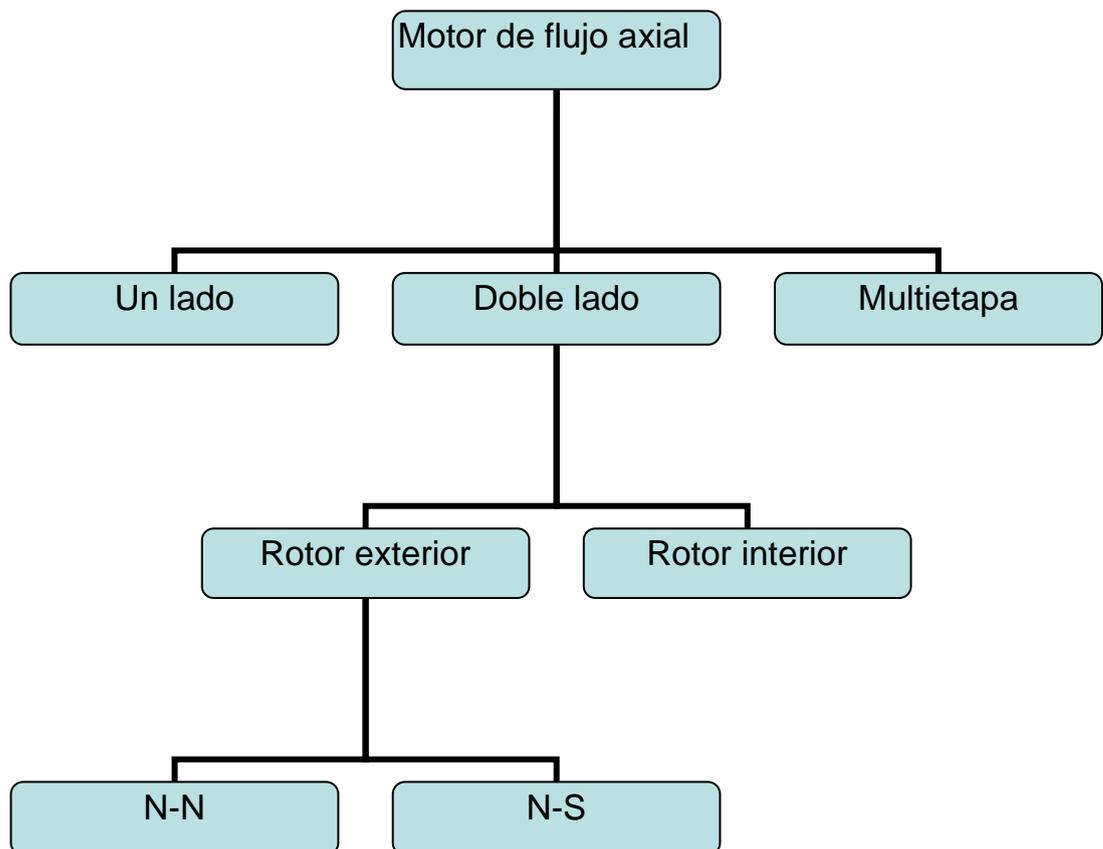
## 2.2 Motor de flujo axial

Los motores de flujo axial fueron los primeros en desarrollarse por su concepción intuitiva, pero caen en descenso debido sobre todo a las dificultades de fabricación existentes al inicio del desarrollo de las máquinas eléctricas.

La característica principal de un motor de flujo axial es que el devanado

inductor crea un campo magnético paralelo al eje de giro rotórico o principal del rotor.

Uno de los aspectos más interesantes de las máquinas de flujo axial es la amplia gama de topologías que ofrecen.



Esta flexibilidad constructiva hace que las máquinas axiales sean adecuadas para diferentes aplicaciones y optimizables para los requisitos específicos de cada aplicación.

Al igual que en las máquinas de flujo radial, en las máquinas de flujo axial el devanado puede estar concentrado o distribuido. En el caso de los devanados concentrados, las bobinas se enrollan alrededor de los dientes, mientras que en el caso de los devanados distribuidos, las bobinas rodean más de un diente.

- **Un lado**

Esta es la topología más simple en el rango de máquinas de flujo axial. Este tipo de máquina consiste en un solo estator y un solo rotor. El núcleo del estator puede estar ranurado (Figura 2.5) o sin ranura (Figura 2.6).

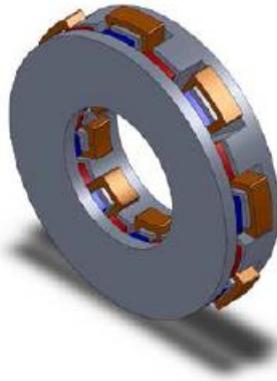


Figura 2.5: Máquina de un solo lado estator ranurado.

Fuente: ([26] Electric Energy Magazine N° 4)

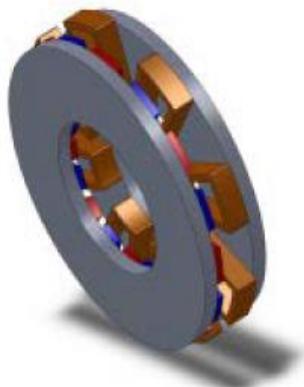


Figura 2.6: Máquina de un solo lado estator sin ranura.

Fuente: ([26] Electric Energy Magazine N° 4)

En esta configuración, la fuerza de atracción ejercida por los imanes entre el rotor y el estator puede ser un inconveniente. El eje y los cojinetes deben soportar esta fuerza, por lo que deben dimensionarse correctamente.

- **Doble lado**

Las máquinas laterales dobles constan de tres elementos en dos configuraciones posibles, Estator doble - Rotor único (el rotor interior se coloca entre dos estatores) y Estator único - Rotor doble (el estator interior se coloca entre dos rotores).

- Máquinas de flujo axial de rotor interior

En este tipo de máquinas, se coloca un rotor interior entre dos estatores. Una de las ventajas interesantes de esta configuración es que se puede evitar el núcleo del rotor que se muestra en la figura 2.7 para obtener un rotor sin núcleo como se muestra en la figura 2.8. Los imanes deben mantenerse en un material no ferromagnético para crear la estructura del rotor. De esta forma, se obtiene una máquina más liviana. Se debe tener en cuenta que debido a que el rotor está entre los dos estatores y en el caso en que la distancia desde el rotor a cada estator es igual, las fuerzas de atracción se equilibran, evitando la posible tensión en las partes mecánicas.

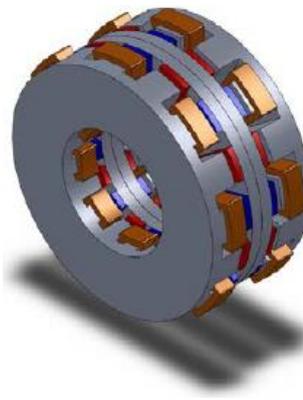


Figura 2.7: Máquinas de rotor interior con núcleo ferromagnético en el rotor.

Fuente: ([26] Electric Energy Magazine Nº 4)

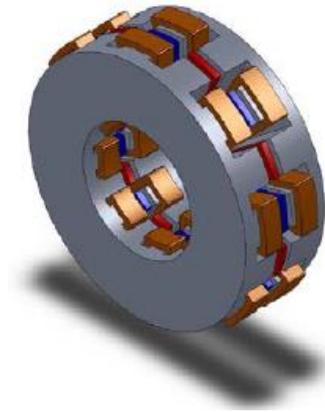


Figura 2.8: Máquinas de rotor interior con rotor sin núcleo

Fuente: ([26] Electric Energy Magazine N° 4)

Al igual que las máquinas de un solo lado, los estatores pueden ser ranurados o sin ranura. La conexión eléctrica entre los dos estatores puede realizarse en serie o en paralelo, teniendo en cuenta que las características de la máquina dependen de esta conexión: mayor tensión en una conexión en serie y mayor corriente en una conexión en paralelo.

- Máquinas de flujo axial con estator interior.

En esta topología, los imanes generalmente se montan en un material ferromagnético para facilitar el flujo magnético entre los imanes adyacentes.

Existe una amplia gama de posibilidades para la configuración de los estatores en estas máquinas. Por un lado, en la configuración conocida como norte-norte (N-N), los imanes con dirección de magnetización opuesta se colocan uno frente al otro, como se muestra en la Figura 2.9 y Figura 2.10.

En esta configuración, la ruta del flujo magnético se cierra a lo largo del yugo del estator, de modo que se necesita el núcleo del estator. El devanado puede colocarse alrededor de los dientes, como se muestra en la Figura 2.9. Esta figura muestra un estator ranurado con devanado concentrado de una capa. Sin embargo, también sería posible un bobinado toroidal con un estator sin ranuras, como se muestra en la Figura 2.10. La principal desventaja de las máquinas sin

ranura es que las bobinas tienen lugar en el entrehierro, lo que aumenta la longitud efectiva del entrehierro.

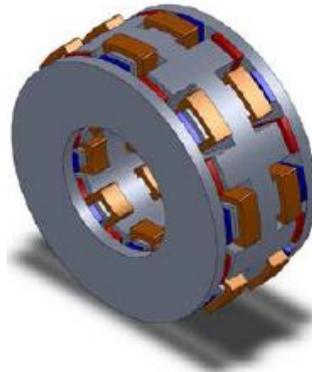


Figura 2.9: Máquina N-N con estator ranurado interior con arrollamiento.

Fuente: ([26] Electric Energy Magazine Nº 4)

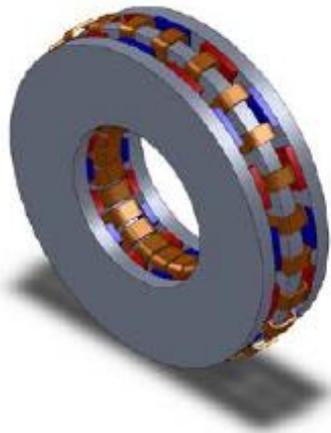


Figura 2.10: Máquina N-N con estator sin ranura interior con devanado toroidal.

Fuente: ([26] Electric Energy Magazine Nº 4)

Otra configuración posible es la máquina norte-sur (N-S). En este caso, los imanes con la misma dirección de magnetización se colocan uno frente al otro. El flujo magnético pasa a través del entrehierro y luego se cierra a través del yugo del rotor. Debido a que el camino seguido por el flujo no usa el yugo del estator, esta parte podría evitarse, lo que llevaría a un núcleo del estator más ligero que

consiste únicamente en dientes ferromagnéticos, como se muestra en la figura 2.11. Además, incluso podría ser posible evitar todo el núcleo del estator y colocar las bobinas en el espacio de aire como se muestra en la Figura 2.12. Sin embargo, la configuración N-S no es factible con los devanados toroidales porque ambas fuerzas laterales se cancelarían entre sí, lo que daría como resultado un par total nulo.

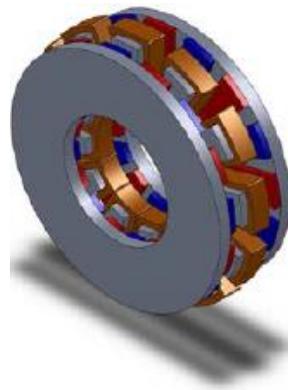


Figura 2.11: Máquina N-S con estator interno de núcleo ferromagnético.

Fuente: ([26] Electric Energy Magazine N° 4)



Figura 2.12: Máquina N-S estator sin núcleo interior.

Fuente: ([26] Electric Energy Magazine N° 4)

- **Multietapa**

Esta topología podría definirse con más precisión como un concepto que como un tipo de máquina. La idea es colocar estatores y rotores alternativamente para obtener una máquina con tantos lados o etapas como se desee para cumplir con los requisitos de la aplicación. La Figura 2-13 muestra una máquina axial de varias etapas con dos estatores y tres rotores. La conexión entre el devanado de diferentes etapas se puede hacer en serie o en paralelo. Además, se podría hacer una conexión / desconexión de las etapas dependiendo de los requisitos temporales de la aplicación. Esta conexión puede permitir la tolerancia a fallas ya que la máquina puede seguir funcionando incluso si cualquiera de las etapas está dañada o desconectada.

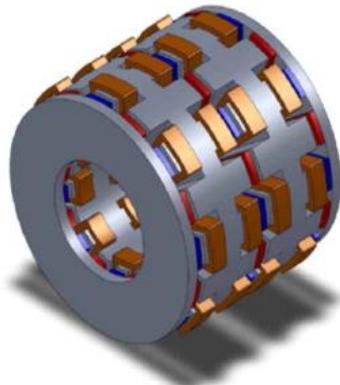


Figura 2.13: Máquina de flujo axial de varias etapas con dos estatores y tres rotores.

Fuente: ([26] Electric Energy Magazine N° 4)

## Capítulo 3 - Motores brushless de flujo axial

### 3.1 Estructura de un motor brushless de flujo axial

El Motor CC sin escobillas, Brushless o BLDC es un tipo de motor síncrono formado por imanes permanentes que se encuentran en el rotor, y con un estator, parte fija, formado por un conjunto de bobinados distribuidos de manera que forman un motor trifásico.

Los imanes permanentes del rotor generan un flujo magnético, dando como resultado una dirección magnética principal, la cual es atraída por los polos electromagnéticos que se producen al energizar las bobinas del estator.

Utilizando la secuencia apropiada para conmutar las fases (bobinados) del estator, se genera un campo magnético rotatorio en el mismo. Esta acción hace que la dirección del rotor persiga al campo generado en el estator.

Como su nombre lo indica no presenta escobillas como los motores CC y la conmutación de los bobinados se realiza de forma electrónica.

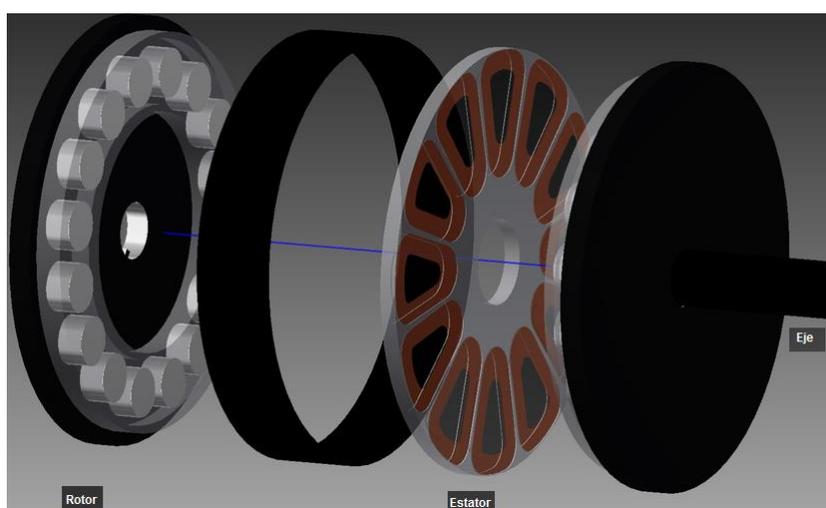


Figura 3.1: Motor brushless de flujo axial.  
Fuente: ([26] Electric Energy Magazine N° 4)

### 3.1.1 Rotor

El rotor de un motor BLDC típico está hecho de imanes permanentes. Dependiendo de los requisitos de la aplicación, el número de polos en el rotor puede variar. El aumento del número de polos ofrece una mejor par motor, pero a costa de reducir la velocidad máxima posible.

Existen múltiples materiales magnéticos, como mezclas ferrosas y aleaciones de tierras raras. Los imanes de ferrita son tradicionales y relativamente baratos, aunque los imanes de aleación de tierras raras son cada vez más populares debido a su alta densidad magnética. La mayor densidad ayuda a encoger los rotores manteniendo un alto par relativo cuando se compara con los imanes de ferrita similares (Figura 3.2).

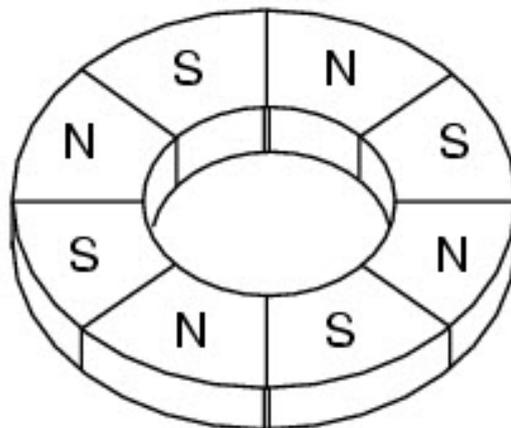


Figura 3.2: Topología del rotor de un motor brushless de flujo axial.

Fuente: ([1] Dr Duane Hanselman, "Brushless Permanent Magnet Motor Design")

### 3.1.2 Estator

El estator del motor BLDC está hecho de láminas de acero apiladas donde se colocan los devanados. Los devanados en un estator pueden disponerse en dos patrones; un patrón de estrella (Y) o el patrón de delta ( $\Delta$ ). La principal diferencia entre los dos patrones es que el patrón Y da un alto par a bajas revoluciones por minuto (rpm) y el patrón  $\Delta$  da bajo par a bajas rpm. Esto es porque en la configuración  $\Delta$ , la mitad de la tensión se aplica a través del devanado que no está accionado, lo que aumenta las pérdidas y, a su vez, la eficiencia y el par (Figura 3.3).

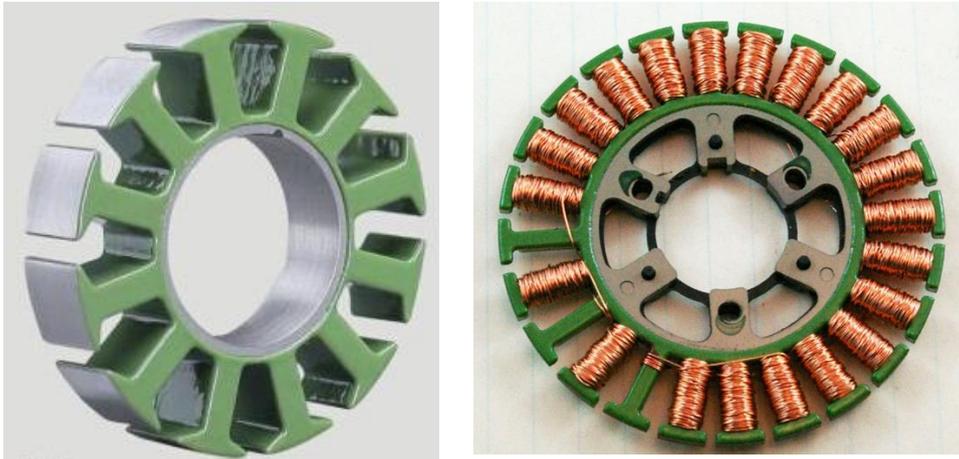


Figura 3.3: Topología del estator de un motor brushless de flujo radial.

Fuente: ([1] Dr Duane Hanselman, “Brushless Permanent Magnet Motor Design”)

Se utilizan dos tipos de devanados en el estator: trapezoidal y sinusoidal. La forma del FCEM está determinada por las diferentes interconexiones de la bobina y la distancia del entrehierro. Además de la FCEM, la corriente de fase también sigue una forma trapezoidal o sinusoidal.

Un motor sinusoidal produce un par electromagnético más suave que un motor trapezoidal, a un costo mayor debido a su uso de bobinados de cobre extra. Un motor BLDC con una estructura más simplificada se logra con devanados

trapezoidales en el estator (Figura 3.4 y 3.5).

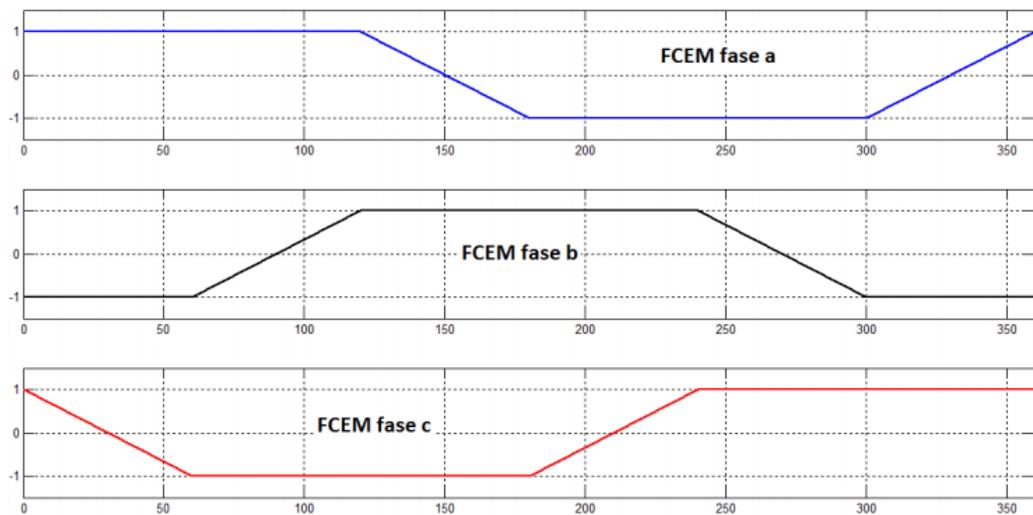


Figura 3.4: Fuerza contra electromotriz trapezoidal.

Fuente: ([10] Application Note AN047, "Brushless DC Motor Fundamentals")

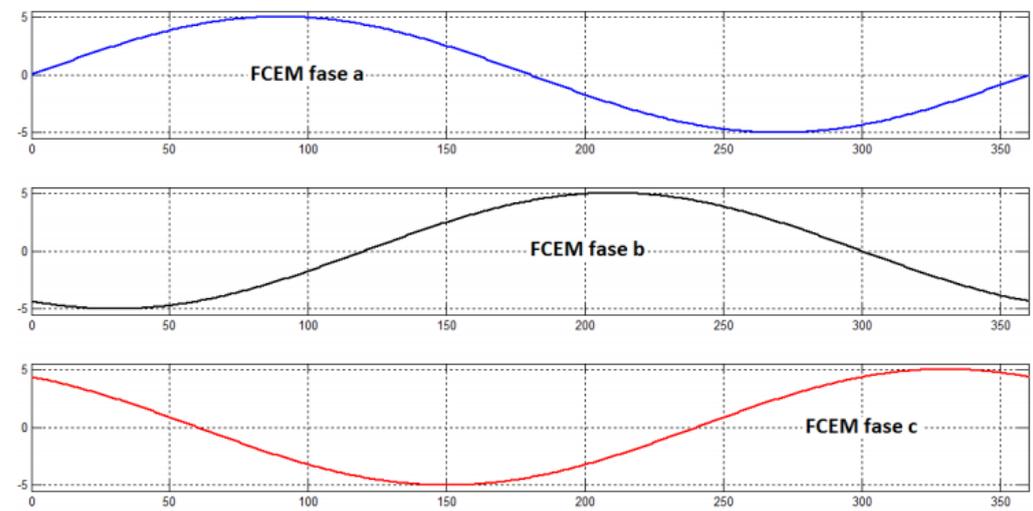


Figura 3.5: Fuerza contra electromotriz sinusoidal.

Fuente: ([10] Application Note AN047, "Brushless DC Motor Fundamentals")

### 3.1.3 Sensor hall

La forma más simple para conocer la posición del rotor, y generar la secuencia de conmutación de los devanados es utilizar sensores de efecto hall, desfasados  $120^\circ$  entre sí. Cada sensor, da una salida digital en alto por cada  $180^\circ$  de rotación eléctrica, y una salida digital baja en los otros  $180^\circ$ . Como resultado de las mediciones de los sensores se genera seis códigos de bits únicos, correspondientes a cada una de las fases de conmutación (Figura 3.6).

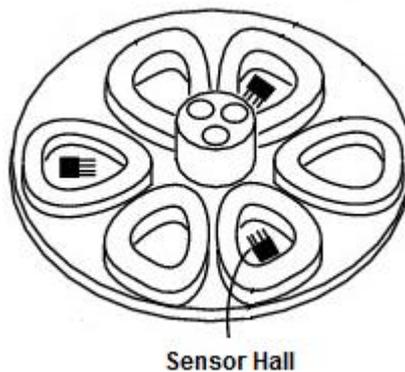


Figura 3.6: Sensores Hall.

Fuente: ([1] Dr Duane Hanselman, "Brushless Permanent Magnet Motor Design")

### 3.2 Teoría de funcionamiento

En este tipo de motor la corriente eléctrica pasa directamente por los bobinados del estator, por lo tanto aquí no son necesarias ni las escobillas ni el colector que se utilizan en los motores CC convencionales. Esta corriente eléctrica genera un campo electromagnético que interacciona con el campo magnético creado por los imanes permanentes del rotor, haciendo que aparezca una fuerza que hace girar al rotor y por lo tanto al eje del motor.

El elemento que controlará que el rotor gire sea cual sea su posición será el inversor o variador electrónico (Figura 3.7); que lo que hace básicamente es hacer que la corriente llegue de forma adecuada a cada uno de las llaves electrónicas para provocar el movimiento de rotación, este mecanismo se denomina “conmutación de seis pasos”.

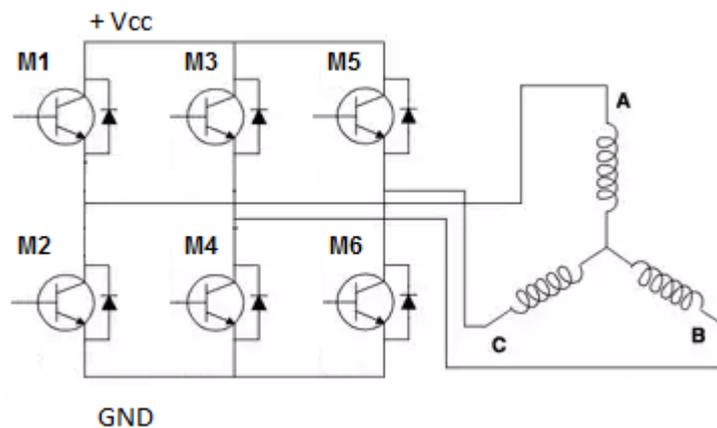


Figura 3.7: Inversor o variador electrónico.

Fuente: ([10] Application Note AN047, “Brushless DC Motor Fundamentals”)

### 3.2.1 Conmutación de seis pasos

La conmutación de seis pasos o el control trapezoidal de 120 grados es el método más simple y empleado para comandar un motor sin escobillas.

En este esquema de control, la producción de par sigue el principio en el que la corriente fluirá en dos de las tres fases al mismo tiempo y que el ángulo entre el campo magnético del estator y el flujo del rotor se mantiene cerca de 90 grados para obtener el par máximo generado.

La Figura 3.8 describe las formas de onda eléctrica de las señales de tensión, corriente y sensor hall del motor con respecto al ángulo del rotor del

motor BLDC. Normalmente, la mayoría de los motores BLDC se suministran con 3 sensores integrados situados a 120 grados uno del otro. Esto proporciona las señales digitales requeridas (alto / bajo) para que el controlador determine la posición del rotor en intervalos de 60 grados eléctricos. La colocación de los sensores a 120 grados es la configuración más popular porque en condiciones normales nunca genera los códigos en los cuales los tres sensores son altos o bajos simultáneamente. Esto significa que los códigos binarios 111 o 000 no son válidos.

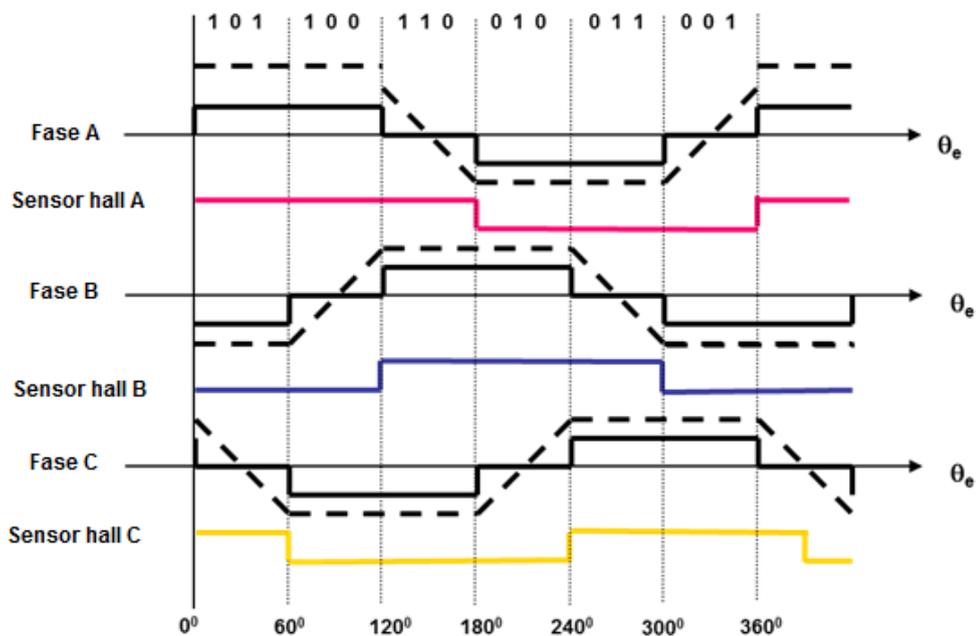


Figura 3.8: Formas de onda de tensión de fase, corriente y de cada sensor Hall con respecto al ángulo eléctrico del rotor.

Fuente: ([10] Application Note AN047, "Brushless DC Motor Fundamentals")

Como se mencionó anteriormente, la secuencia de conmutación se realiza cada 60 grados y esto equivale a un estado de activación de las bobinas, en donde dos bobinas son alimentadas cumpliendo la lógica y secuencia de conmutación como se puede apreciar en la Figura 3.9. Se tiene una activación con tensión positiva y negativa correspondiente, la tercera bobina permanece en

un estado no activado y esta secuencia de conmutación la dan los sensores hall que están monitoreando la posición del rotor.

Un ciclo eléctrico puede que no corresponda a una revolución mecánica completa del rotor, el número de ciclos eléctricos que se repiten para una rotación mecánica tiene que ver con el número de polos. La cantidad de ciclos eléctricos para lograr una rotación mecánica es igual a los pares de polos del rotor.

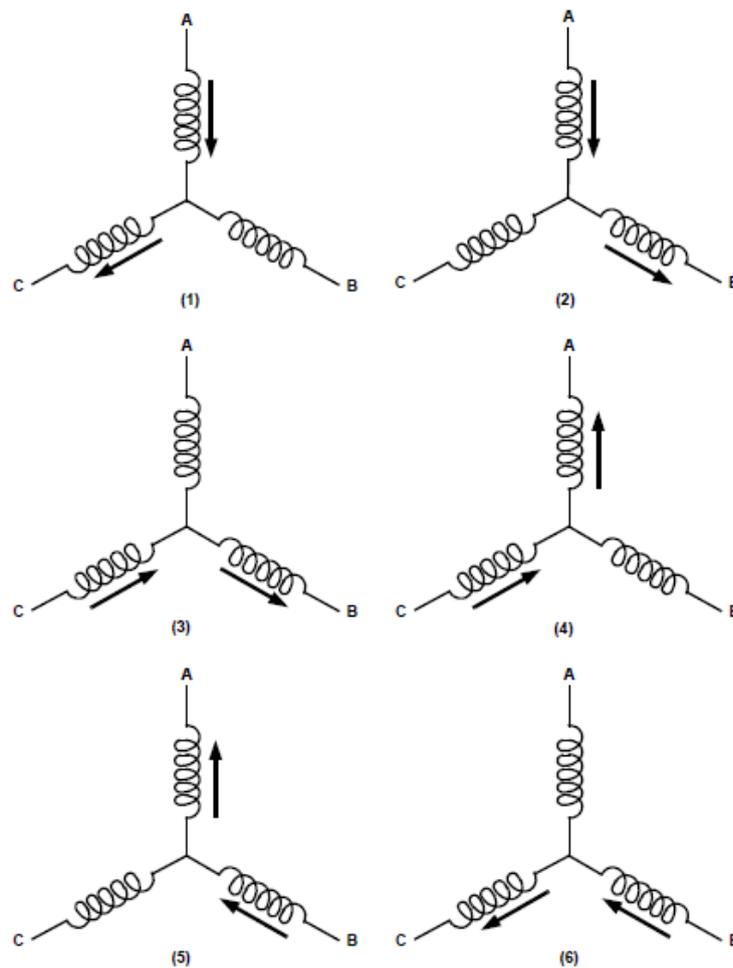


Figura 3.9: Modo de excitación de los bobinados, conducción a 120°.  
Fuente: ([10] Application Note AN047, "Brushless DC Motor Fundamentals")

A continuación se expondrá en la tabla 3.1 y 3.2 la conmutación de seis estados para el inversor trifásico. Esta tabla proporciona la secuencia apropiada de excitación de las fases del motor con respecto al código binario generado a partir de los tres sensores hall. Cumplir con esta secuencia es fundamental para hacer girar el motor de manera eficiente y para asegurarse de que la corriente se inyecta a la fase adecuada en la duración del tiempo adecuado.

Sensores Hall			Mosfet		Fases		
H1	H2	H3			A	B	C
1	0	1	M3	M6	off	+	-
1	0	0	M1	M4	+	-	off
1	1	0	M2	M5	-	off	+
0	1	0	M4	M5	off	-	+
0	1	1	M1	M6	+	off	-
0	0	1	M2	M3	-	+	off

Tabla 3.1: Secuencia de conmutación, sentido horario.

Sensores Hall			Mosfet		Fases		
H1	H2	H3			A	B	C
1	0	1	M5	M4	off	-	+
1	0	0	M5	M2	-	+	off
1	1	0	M3	M2	+	off	-
0	1	0	M3	M6	off	+	-
0	1	1	M1	M6	-	off	+
0	0	1	M1	M4	+	-	off

Tabla 3.2: Secuencia de conmutación, sentido anti-horario.

Para que el motor funcione, y por lo tanto genere par se tiene que dar la

condición de que exista un ángulo entre el campo magnético generado por los devanados alimentados y el campo magnético propio de los imanes del rotor. Para obtener el máximo par y un funcionamiento perfecto el objetivo es mantener siempre el ángulo lo más cercano a  $90^\circ$  dando lugar al par máximo para unas condiciones de corriente dadas. De esta manera la secuencia en cada momento ha de ir adecuándose al giro del rotor de forma que se mantengan la perpendicularidad entre ambos campos magnéticos.

### 3.3 Modelo eléctrico del motor brushless

Un sencillo modelo eléctrico de los motores BLDC es el mismo de un motor eléctrico de corriente continua. En la Figura 3.10 encontramos el modelo eléctrico constituido por una impedancia la cual por diseño debe ser pequeña. Dicha impedancia se forma a partir de la resistencia que poseen las pistas de cobre y la inductancia de los devanados que tiene el motor en su interior. Cuando el motor se encuentra girando, los imanes del rotor giran induciendo un potencial eléctrico en las bobinas del estator. Este potencial es llamado fuerza contra-electromotriz (BEMF).

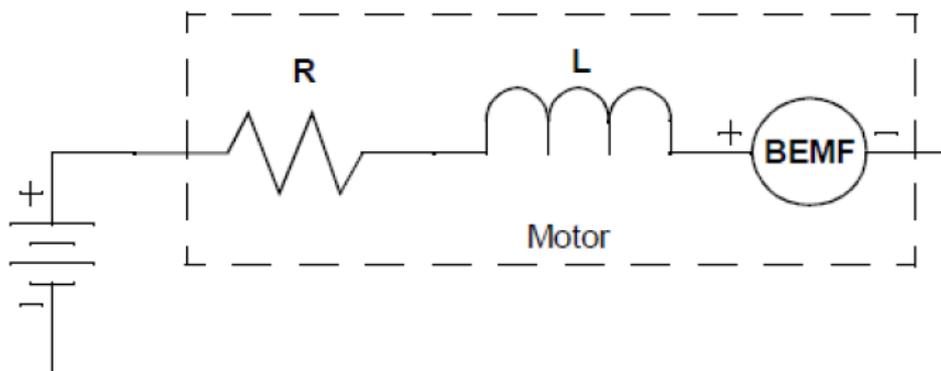


Figura 3.10: Modelo eléctrico Motor Brushless.

Fuente: ([1] Dr Duane Hanselman, "Brushless Permanent Magnet Motor Design")

La BEMF es directamente proporcional a la velocidad del motor y está determinada por la constante del motor  $K_V$ . Idealmente en un motor el valor de la resistencia y la inductancia son cero lo que permitiría que el motor girara a una velocidad tal que la BEMF fuera igual a la tensión aplicada.

$$RPM = K_V * Voltios$$

$$BEMF = RPM/K_V$$

La corriente que el motor consume es directamente proporcional a la carga en el eje del motor y está determinada por la constante de torque del motor  $K_T$ .

$$T = K_T * I$$

T: torque

I: corriente

### 3.4 Relación torque vs velocidad

La Figura 3.11 muestra un ejemplo de las características de Torque / Velocidad. Hay dos parámetros de par que se utiliza para definir un motor BLDC: el Par Máximo y el Par Nominal. Durante las operaciones continuas, el motor puede ser cargado con el par nominal y dicho par se mantiene constante para un rango de velocidad hasta la Velocidad Nominal. El motor puede funcionar a la Velocidad Máxima, que puede ser hasta el 150% de la velocidad nominal, pero el par comienza a caer. En las aplicaciones en las que aparecen arranques y paradas frecuentes y cambios frecuentes de rotación con carga en el motor, la demanda crece por encima del Par Nominal. Este requisito está dado porque durante un breve período tiempo, especialmente cuando el motor arranca desde parado y durante una aceleración, el par adicional es necesario para poder superar la inercia de la carga y el propio rotor. El motor puede entregar un par mayor hasta un valor máximo, siempre y cuando se siga la curva de par/velocidad.

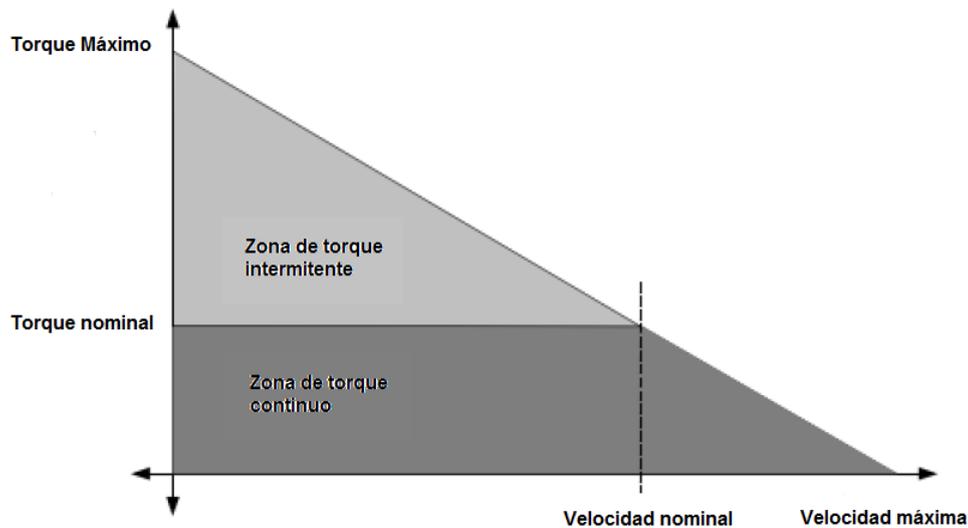


Figura 3.11: Relación Torque vs Velocidad

Fuente: ([1] Dr Duane Hanselman, “Brushless Permanent Magnet Motor Design”)

### 3.5 Modulación por ancho de pulso (PWM)

El inversor y el sensor de posición en un BLDC constituyen el conmutador electrónico. Para regular la velocidad del BLDC, los mosfet se activan utilizando la modulación por ancho de pulsos, conocida como PWM (Pulse Width Modulation).

El PWM consiste en modificar la cantidad de energía que recibe el motor. Si se conecta el motor a una fuente directamente el motor comienza a acelerar hasta que alcanza cierta velocidad, si en ese momento se desconecta, el motor desacelera hasta que se para. Así pues al conectar y desconectar repetidamente el motor de la fuente en intervalos pequeños el motor no llega a pararse y gira más despacio, es decir, mantiene el par motor (o torque) constante y no supone un desaprovechamiento de la energía eléctrica lo cual es una ventaja frente a otros sistemas. Algunos de estos para regular la velocidad modifican la tensión eléctrica, con lo que disminuye el par motor; o interponen una resistencia eléctrica, perdiendo energía en forma de calor en esta resistencia.

De este modo dependiendo del tiempo que se mantenga conectado y desconectado se pueden obtener distintas velocidades, esto se conoce como

ciclo de trabajo (Duty Cycle).

### 3.6 Motor BLDC vs Motor CC

Motor BLDC	Motor CC
Utiliza la conmutación electrónica basada en sensores de efecto hall.	Utiliza conmutación con escobillas.
Requiere menos mantenimiento debido a la ausencia de escobillas.	Requiere mantenimiento periódico.
El control del motor es complejo y costoso.	El control del motor es simple y barato.
Requiere el controlador para mantener el motor en funcionamiento. El mismo controlador se puede usar para control de velocidad variable.	No se requiere controlador para velocidad fija. Se requiere un controlador solo si se desea una velocidad variable.
Las características de par de velocidad son planas.	Las características del par de velocidad son moderadamente planas.
El flujo esta de forma paralela al eje de salida.	El flujo está entrando y saliendo del centro eje.
El recorrido del flujo es menor	El recorrido del flujo es mayor, genera más pérdidas.
La potencia de salida / tamaño de cuadro es mayor. Conduce a características térmicas superiores que dan como resultado una reducción de tamaño. Debido a que BLDC tiene los arrollamientos en el estator, la disipación de calor es mejor.	El tamaño de potencia / marco de salida es moderado o bajo. El calor producido por la armadura se disipa en el entrehierro, aumentando así la temperatura en el entrehierro y limitando las especificaciones sobre la potencia de salida del tamaño del marco.
La inercia del rotor es baja. Porque tiene imanes permanentes en el rotor. Esto mejora la respuesta dinámica.	La inercia del rotor es mayor. Esto limita la característica dinámica

El rango de velocidad es mayor. Por lo tanto, no se imponen limitaciones mecánicas por los cepillos o el colector.	El rango de velocidad es más bajo. Permite limitaciones mecánicas por los cepillos.
Tienen entrehierro plano ajustable	Tienen entrehierro fijo
Tiene una vida más larga.	Tiene una vida más corta.

## Capítulo 4 - Inversor

Un inversor tiene como función cambiar una tensión de entrada de continua a una tensión simétrica de salida de alterna, con una cierta magnitud y frecuencia establecida por el diseñador. Está formado por varias etapas:

- Aislación galvánica
- Drivers
- Puente trifásico formado por las llaves electrónicas

### 4.1 Transistores de potencia

Los transistores de potencia poseen características controladas de activación y desactivación, lo que los hace muy útiles en aplicaciones como convertidores de corriente alterna a directa y viceversa, donde los transistores trabajan en las regiones de corte y saturación.

Los transistores de potencia de acuerdo a las características de funcionamiento y construcción se los clasifica en:

- Transistores bipolares (BJT).
- Transistores metal óxido semiconductor de efecto de campo (MOSFET).
- Transistores de compuerta aislada (IGBT).

Para la elección de los dispositivos de conmutación se recurrirá a graficas de selección según la tensión y corriente de trabajo (Figura 4.1).

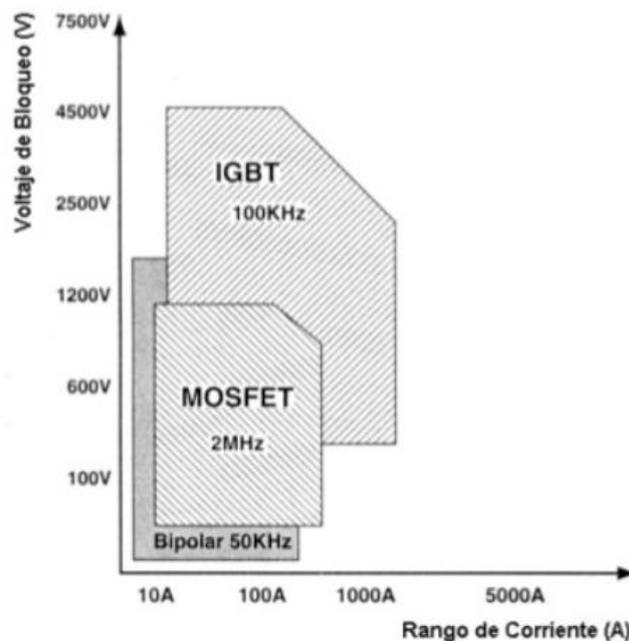


Figura 4.1: Grafico de selección de transistores de potencia.

Fuente: ([24] Application Note – “Power Mosfet” By Renesas Electronics Corporation)

Haciendo una comparación entre los transistores bipolares (BJT) y los transistores metal óxido semiconductor de efecto de campo (MOSFET), los primeros son *dispositivos controlado por corriente*, mientras que los segundos son *dispositivos controlados por tensión*. En ambos casos, la corriente del circuito de salida es controlada por un parámetro del circuito de entrada, en un caso el nivel de corriente y en el otro el nivel de tensión aplicada.

En los mosfet se crea un campo eléctrico que controla la anchura del camino de conducción del circuito de salida sin que exista contacto directo entre la magnitud controlada (corriente) y la magnitud controladora (tensión). De forma análoga a como en los transistores bipolares existen dos tipos *npn* y *pnp*, en los transistores de efecto de campo se habla de transistores mosfets de *canal n* y de *canal p*.

Una diferencia importante entre ambos tipos de transistores consiste en que mientras que los transistores BJT son *bipolares*, es decir, en la corriente intervienen los dos tipos de portadores (electrones y huecos), los transistores

mosfet son *unipolares*, en los que el nivel de conducción dependerá únicamente de un único tipo de portadores: de los electrones en los de canal n y de los huecos en los de canal p.

En general los mosfet son más estables con la temperatura y, normalmente, más pequeños en construcción que los BJT.

Dentro de estos grupos los más adecuados para la construcción del inversor, son los mosfet.

## 4.2 MOSFET

Existen dos tipos de transistores mosfet:

- Mosfet de acumulación o de enriquecimiento.
- Mosfet de depleción o empobrecimiento.

En este proyecto el estudio se centrara en los mosfets de acumulación.

En la Figura 4.2 aparece representada la estructura básica para un mosfet de canal n, partimos de una zona de material semiconductor tipo p en la que aparecen dos zonas tipo n+ con contactos metálicos a los terminales de drenador y fuente. La zona entre los terminales y el material tipo p corresponde a una capa de material aislante, en este caso óxido de silicio. Por tanto, si nos fijamos en el terminal de puerta, vemos como tenemos una zona metálica (correspondiente al contacto óhmico) una zona de óxido y una zona de semiconductor. Es precisamente debido a esta estructura de dónde le viene el nombre al dispositivo de Metal – Óxido – Semiconductor (MOS). Además, este dispositivo tendría un cuarto terminal, el terminal del Sustrato (SS), aunque habitualmente éste se encuentra conectado a la fuente.

Es preciso que notemos una característica fundamental de este dispositivo y es que la puerta está aislada eléctricamente del dispositivo, es decir, no hay conexión eléctrica entre la puerta y el sustrato.

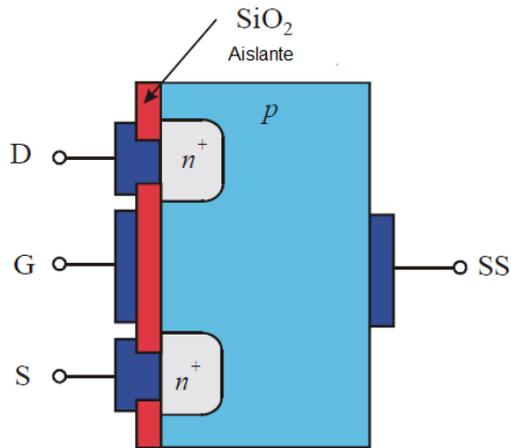


Figura 4.2: Estructura del mosfet de acumulación canal n.  
 Fuente: ([24] Application Note – “Power Mosfet” By Renesas Electronics Corporation)

Para el funcionamiento más habitual, los transistores mosfet de acumulación de canal n se polarizan tal y como aparece en la Figura 4.3.

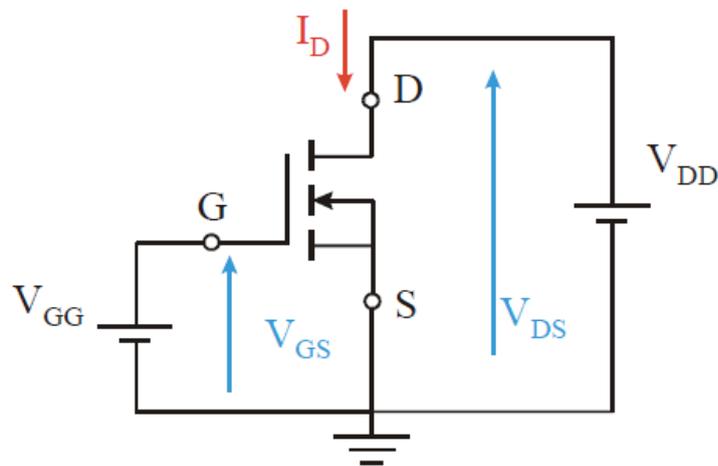


Figura 4.3: Polarización del mosfet de acumulación canal n.  
 Fuente: ([24] Application Note – “Power Mosfet” By Renesas Electronics Corporation)

Los transistores mosfet de acumulación de canal n se polarizan aplicando una tensión positiva entre drenador y fuente ( $V_{DS}$ ) y una tensión positiva entre puerta y fuente ( $V_{GS}$ ). De esta forma, la corriente circulará en el sentido de drenador a fuente. Si aplicamos una tensión  $V_{GS} = 0$ , aunque apliquemos una tensión  $V_{DS}$  no circulará corriente alguna por el dispositivo, ya que la unión de drenador está polarizada en inversa. Para valores pequeños de esta tensión  $V_{GS}$  aplicada se creará una zona de carga de espacio (sin portadores), al seguir aumentando el valor de esta tensión, la acumulación de electrones se hará lo suficientemente importante como para decir que tenemos una zona n, es decir, se formará un canal de tipo n que unirá los terminales de drenador y fuente.

De esta forma, cuanto mayor sea la tensión  $V_{GS}$  aplicada mayor será la anchura del canal formado, es decir, de nuevo tenemos un efecto de modulación de anchura del canal con la tensión  $V_{GS}$ , no basta con que esta tensión sea positiva, sino que deberá superar un determinado nivel de tensión. A esta tensión umbral a partir de la cual hay canal formado que permite la circulación de corriente entre el drenador y la fuente en algunos libros se le suele llamar  $V_T$  (Tensión de Threshold).

### **4.3 Topología del inversor**

La conmutación de la secuencia en un motor BLDC, se guía a partir de la lectura de los estados lógicos dados por los sensores de efecto hall. De acuerdo al resultado de estos, se controlan los diferentes estados de las fases del motor utilizando un puente trifásico (Figura 4.4).

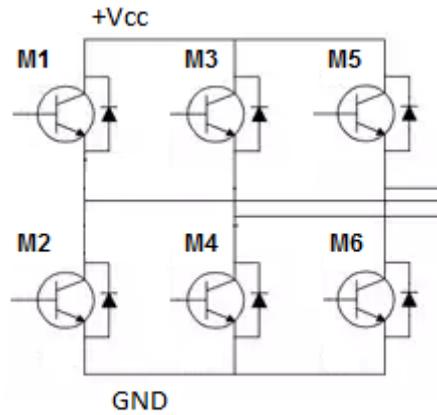


Figura 4.4: Puente H trifásico.

Fuente: ([1] Dr Duane Hanselman, “Brushless Permanent Magnet Motor Design”)

Un puente trifásico se encuentra conformado por tres fases de dos mosfets cada una. Cada uno de los mosfets recibe a través del driver niveles lógicos alto para hacer que conduzca y bajo para que se apague. De esta forma se establecen seis maneras distintas de circulación de corriente en las fases.

#### 4.4 Principio de funcionamiento del inversor

En el inversor cada interruptor conduce  $120^\circ$  y tendrá una secuencia de disparo de forma tal que conducirán solo dos mosfets a la vez, es decir la corriente fluirá por dos de las tres fases. A continuación se desarrollaran los intervalos de funcionamiento para cada caso:

Modo 1:

$$0 \leq \omega t \leq \pi/3$$

$$V_{AN} = \frac{V_{DC}}{2} \quad V_{BN} = 0 \quad V_{CN} = -\frac{V_{DC}}{2}$$

Modo 2:

$$\pi/3 \leq \omega t \leq 2\pi/3$$
$$V_{AN} = \frac{V_{DC}}{2} \quad V_{BN} = -\frac{V_{DC}}{2} \quad V_{CN} = 0$$

Modo 3:

$$2\pi/3 \leq \omega t \leq \pi$$
$$V_{AN} = 0 \quad V_{BN} = -\frac{V_{DC}}{2} \quad V_{CN} = \frac{V_{DC}}{2}$$

Modo 4:

$$\pi \leq \omega t \leq 4\pi/3$$
$$V_{AN} = -\frac{V_{DC}}{2} \quad V_{BN} = 0 \quad V_{CN} = \frac{V_{DC}}{2}$$

Modo 5:

$$4\pi/3 \leq \omega t \leq 5\pi/3$$
$$V_{AN} = -\frac{V_{DC}}{2} \quad V_{BN} = \frac{V_{DC}}{2} \quad V_{CN} = 0$$

Modo 6:

$$5\pi/3 \leq \omega t \leq 2\pi$$
$$V_{AN} = 0 \quad V_{BN} = \frac{V_{DC}}{2} \quad V_{CN} = -\frac{V_{DC}}{2}$$

La clave para el funcionamiento de un motor sin escobillas es ubicar la posición del rotor. De esto se encargan los tres sensores de efecto hall ubicados en el interior, los cuales nos brindan una secuencia de seis pasos para completar una revolución eléctrica, cada 60° uno de los sensores cambia de estado. El número de ciclos eléctricos para completar una revolución mecánica es determinada por el número de polos magnéticos en el rotor (Figura 4.5).

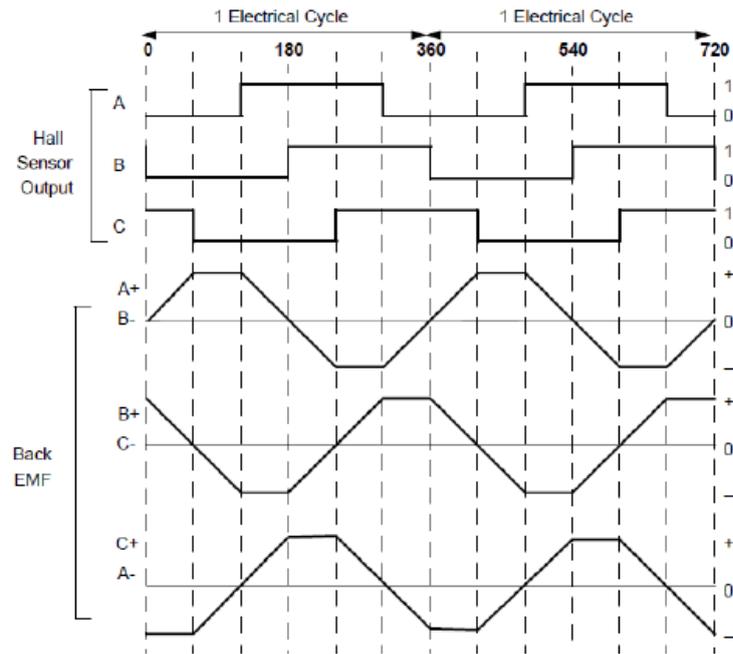


Figura 4.5: Señales de sensores y fcem.

Fuente: ([1] Dr Duane Hanselman, "Brushless Permanent Magnet Motor Design")

# MARCO METODOLÓGICO

## Capítulo 5 - Desarrollo del sistema

El sistema de control está constituido fundamentalmente por cuatro bloques bien definidos, en aplicaciones con motores BLDC:

- Un bloque se encarga del manejo de la etapa de potencia, el cual permite el accionamiento del motor, constituido por transistores mosfet de potencia.
- El segundo bloque es el encargado de realizar la retroalimentación para establecer la posición exacta del rotor, siendo fundamental conocer dicha posición para poder realizar la correcta conmutación. El elemento encargado de realizar la detección es el sensor de efecto Hall.
- Un microcontrolador en el sistema de control que permite procesar las señales para establecer el ancho de pulso necesario para la activación de las bobinas. También establece el control de la velocidad y el régimen de trabajo.
- Por ultimo tenemos los reguladores de tensión de la alimentación que energiza los circuitos analógicos y digitales de los transistores MOSFET.

Estos cuatro bloques fueron encuadrados en los siguientes módulos:

- Módulo de control.
- Módulo de potencia.
- BLDC
- Realimentación

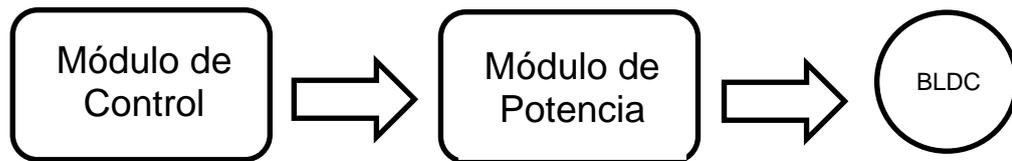


Figura 5.1: Módulos del sistema.

El módulo de control está compuesto por un microcontrolador PIC16F887 encargado de interpretar las señales de los sensores hall de cada motor y desarrollar la secuencia para activar los mosfets correspondientes.

El módulo de potencia está formado por el inversor que a su vez se encuentra constituido por los mosfet y una etapa de aislamiento galvánica para proteger la etapa de control. Estará dividido en dos placas iguales para cada uno de los motores.

Por último, los motores brushless de flujo axial que cuentan con tres sensores hall insertados entre las bobinas del motor, que nos dan información de la posición del rotor.

La estructura se realizó a escala en base a medidas estandarizadas, donde cuenta con un espacio para colocar los circuitos de control, los de potencia y la batería.

## 5.1 Diseño de la estructura

El diseño de la estructura del mini prototipo se realizó en caño redondo metálico con una relación de 3,5 en el tamaño, teniendo en cuenta medidas estándar de las sillas de ruedas convencionales. El objetivo fue hacerla en un tamaño donde puedan alojarse las placas electrónica y lo suficientemente liviana para que puedan ser traccionada por los motores.

Además se construyó una base donde podrá descansar dicho prototipo

para hacer las mediciones correspondientes (Figura 5.2 y 5.3).



Figura 5.2: Vista frontal mini prototipo.

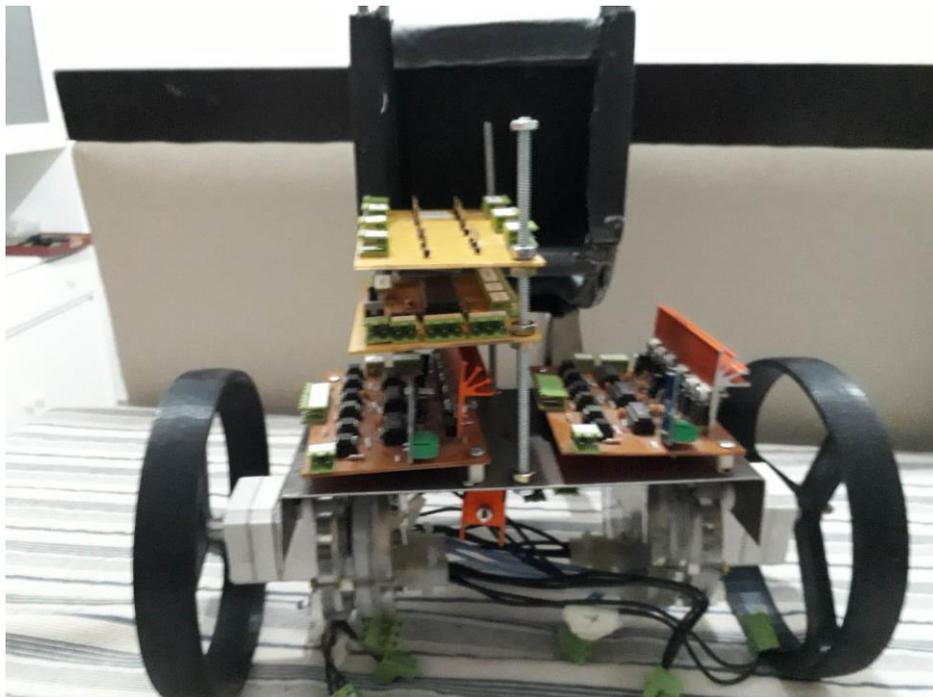


Figura 5.3: Vista trasera mini prototipo.

## 5.2 Circuitos impresos

Para el siguiente proyecto se llevó adelante la realización de cinco placas:

- Circuito de alimentación.
- Circuito de control.
- Circuito de potencia ( dos placas, una para cada motor)
- Circuito de mediciones.

### 5.2.1 Plaqueta de alimentación



Figura 5.4: Plaqueta de alimentación

El circuito de alimentación cuenta con un puerto de entrada donde se conecta la batería, tres salidas 12 V que van directo de la batería y cinco salidas a 5 V (Figura 5.3).

### 5.2.2 Plaqueta de control

La placa de control cuenta con el PIC 16F887A encargado de interpretar las señales de los sensores hall del motor, activar las salidas correspondientes en el circuito de potencia, leer las señales de los sensores de corriente y establecer la conexión bluetooth con el móvil. En ella también se encuentra el módulo bluetooth HC-05 (Figura 5.4).

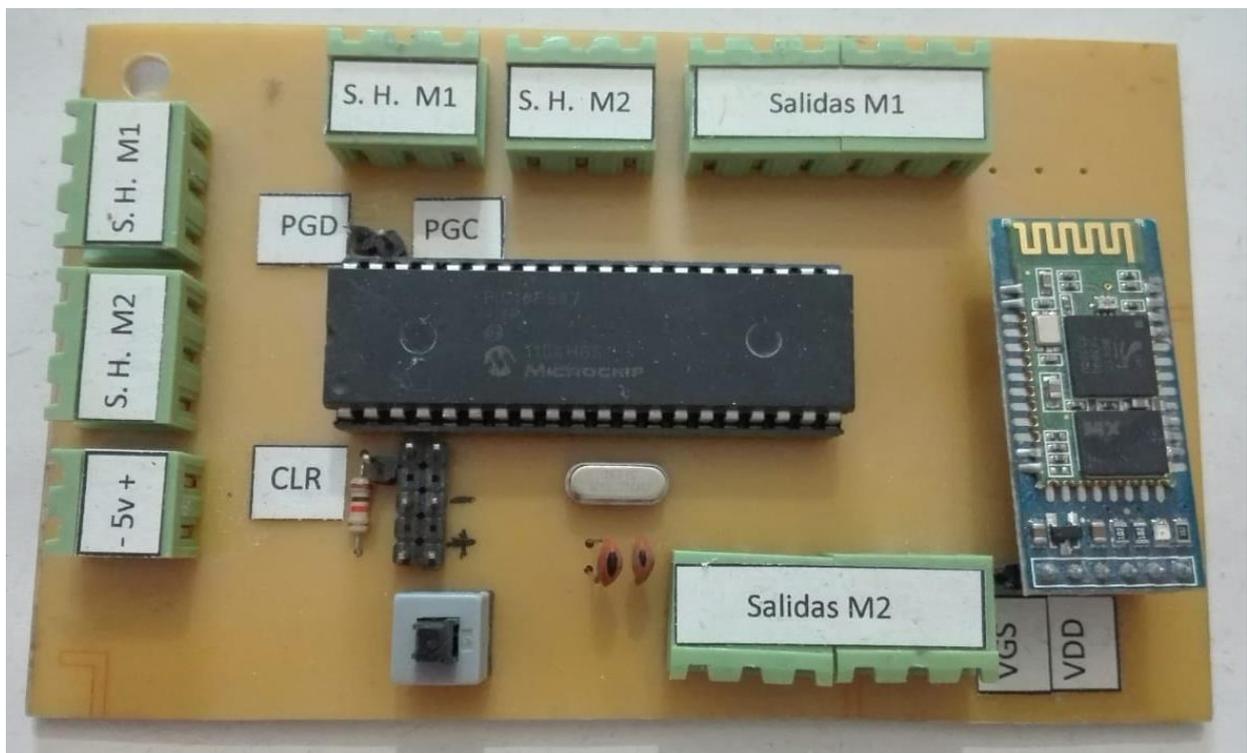


Figura 5.5: Plaqueta de control

Además se dejó acceso a los pines del microcontrolador que permiten realizar la programación serial en circuito (ICSP), es una tecnología incluida en todos los microcontroladores PIC de Microchip y posibilita la reprogramación de los mismos sin que sea necesaria la remoción de éstos de su circuito de aplicación. Esta característica es muy útil no solamente en la etapa de desarrollo debido a que ahorra tiempo y trabajo, sino que su utilidad se extiende a la etapa de mantenimiento, dando la posibilidad de reprogramar los mismos en su respectivas placa ya soldadas, ya sea para corregir errores de software o para la mejora del sistema con la implementación de nuevas funciones (Figura 5.5).



Figura 5.6: Placa de programación puerto ICSP

### 5.2.3 Plaqueta de potencia

En el circuito de potencia se encuentran la etapa de aislación galvánica formada por los integrados 4n25, los drivers IR2110, los mosfet de potencia IRF630 y el sensor de corriente ACS712.

Por el puerto de entradas se recibe las señales del circuito de control que activa a través de los driver los diferentes mosfet que hacen circular la corriente

en diferentes sentidos por los bobinados del motor (Figura 5.6).



Figura 5.7: Plaqueta de Potencia

## 5.2.4 Plaqueta de mediciones

En la placa de mediciones se tiene acceso a las tensiones de alimentación, tensiones en el bobinado de los motores, las señales de los sensores hall y el PWM que se aplica en la etapa de potencia para cada motor (Figura 5.7).



Figura 5.8: Plaqueta de mediciones.

### 5.3 Motores utilizados en el proyecto

Para el proyecto se utilizaron dos motores de iguales características desarrollados por el Ing Raúl Cacace y Ing Adrián Agüero (Figura 3.12 y 3.13).

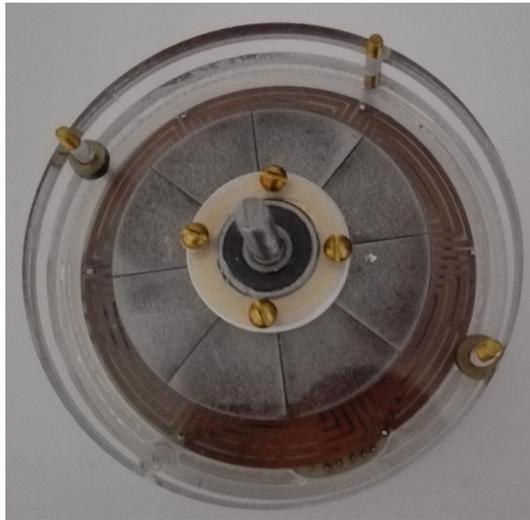


Figura 5.9: Motor brushless de flujo axial.

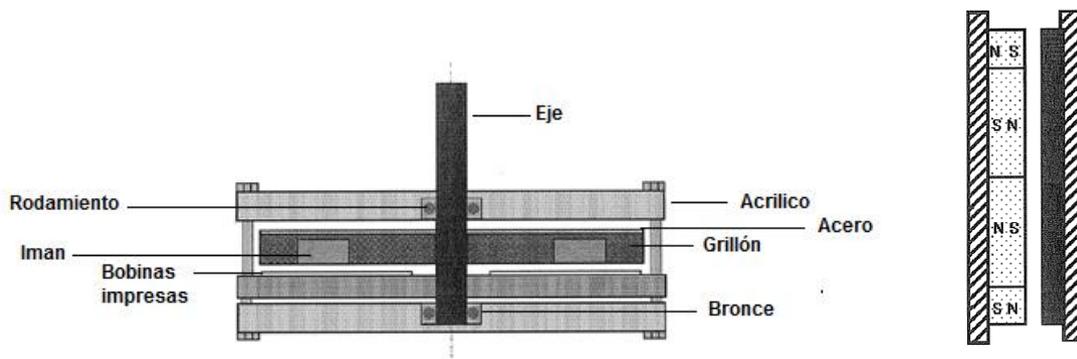


Figura 5.10: Estructura motor brushless sin escobillas de flujo axial.

Fuente: ([26] Raúl S. Cacace, "Diseño, simulación y construcción de un motor plano de flujo axial con imanes de (Nd-Fe-B) y bobinas impresas")

### 5.3.1 Datos técnicos de los motores

Parámetros generales	
Potencia	48 W
Tensión de alimentación	13 V
Número de fases	3

Velocidad base	12500 rpm
Cupla del motor	73 mNm
<b>Estator</b>	
Diámetro externo	80 mm
Diámetro interno	8 mm
Numero de bobinas	6
Resistencia por fase	235,94 m $\Omega$
Auto inductancia	1,205 $\mu$ H
Tipo de bobinado	Circuito impreso de una faz
<b>Rotor</b>	
Numero de polos	8
Diámetro externo	61 mm
Espesor de los imanes	3,17 mm
Diámetro interno	5,8 mm
Diámetro de los imanes	12,7 mm
Peso de los imanes	3 gr
Material de los imanes	Nd-Fe-B
<b>Otros</b>	
Largo de entrehierro	0,2 mm
Ancho del conductor	1,35 mm
Distancia entre dos conductores	0,5 mm
Espesor del conductor	0,07 mm
Sección del conductor	0,095 mm <sup>2</sup>

### 5.3.2 Rotor del motor brushless de flujo axial

El rotor de cuenta con 8 imanes embebidos en un disco de grillón como se observa en la Figura 3.14.

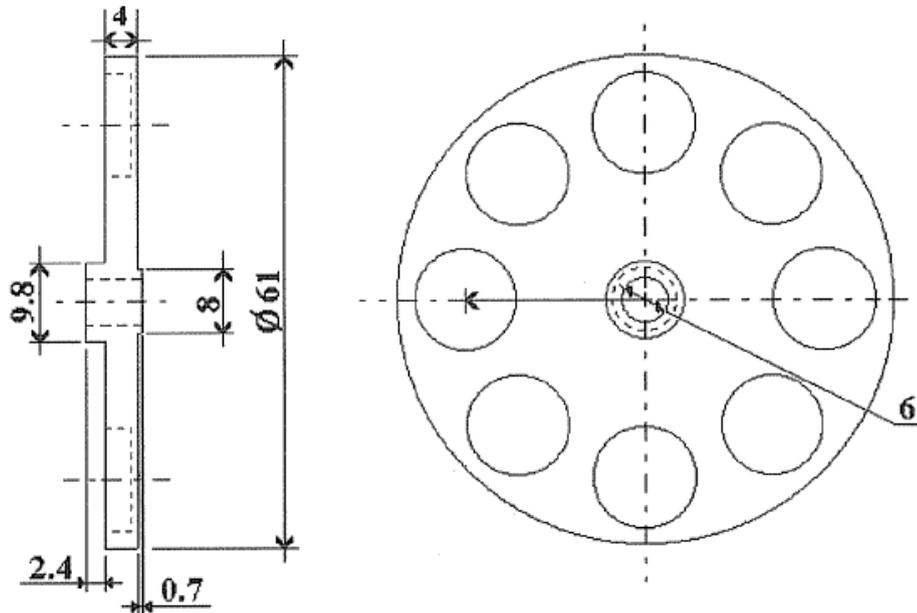


Figura 5.11: Vista lateral y posterior del rotor.

Fuente: ([26] Raúl S. Cacace, "Diseño, simulación y construcción de un motor plano de flujo axial con imanes de (Nd-Fe-B) y bobinas impresas")

Son imanes permanentes de tierras raras constituidos por Nd-Fe-B (Neodimio-Hierro-Boro) que producen gran densidad de flujo favoreciendo la miniaturización del rotor.

Además el circuito magnético cuenta con una laminación de acero de bajo carbono de 0.56mm de espesor con forma de disco, al cual se le practicaron ocho ranuras como se observa en la Figura 3.15. La función es de cierre del flujo magnético y se lo llama back-iron.

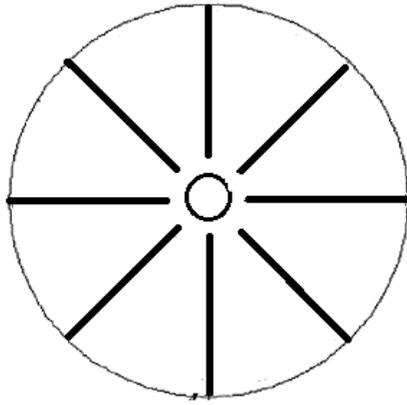


Figura 5.12: Laminación ranurada de acero. Vista anterior.

Fuente: ([26] Raúl S. Cacace, "Diseño, simulación y construcción de un motor plano de flujo axial con imanes de (Nd-Fe-B) y bobinas impresas")

### 5.3.3 Estator del motor brushless de flujo axial

El estator está formado por bobinas impresas en una placa de fibra de vidrio conectadas en estrella (Y) y logrando un diseño compacto. Además en esta placa se encuentran alojados tres los sensores hall (Figura 3.16).

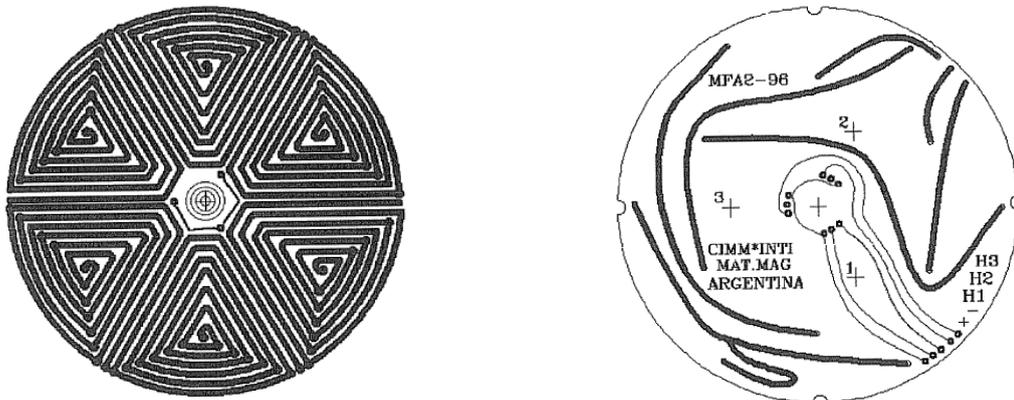


Figura 5.13: Vista anterior y posterior de las bobinas del estator.

Fuente: ([26] Raúl S. Cacace, "Diseño, simulación y construcción de un motor plano de flujo axial con imanes de (Nd-Fe-B) y bobinas impresas")

### 5.3.4 Sensores hall del motor brushless de flujo axial

Los sensores hall nos proporcionan la ubicación del rotor. Su salida es binaria. Al aplicar un campo magnético nos proporciona una salida en alto (ON), en ausencia de campo magnético la salida es bajo (OFF). Así, con la combinación de las salidas de los tres sensores obtenemos la secuencia antes mencionada. En este proyecto se utilizarán sensores hall UGN3132 de la firma Allegro (Figura 5.14).

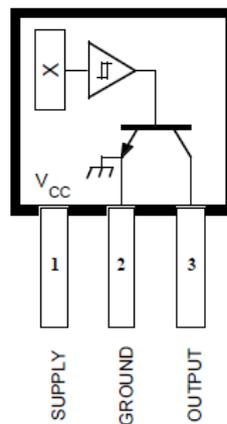


Figura 5.14: Sensor hall.

Fuente: ([17] Datasheet UGN3132)

## Capítulo 6 - Desarrollo del módulo de control

El controlador es un componente fundamental en la constitución del convertidor. Entre las diferentes tareas que tiene a cargo es el que genera las señales de encendido y apagado de los dispositivos semiconductores y garantiza su buen comportamiento.

### 6.1 Microcontrolador

Teniendo en cuenta los requerimientos necesarios para el proyecto y aprovechando los conocimientos obtenidos en Electrónica Digital II se utilizó el microcontrolador PIC16F887A (Figura 6.1). A continuación se describen las características principales del mismo:

- Procesador de arquitectura RISC (Reduced Instruction Set Computer).
- Frecuencia de hasta 20 Mhz.
- Voltaje de operación entre 2 y 5.5V.
- Corriente máxima 25mA.
- Bajo consumo.
- Timer0, Timer1 y Timer2 para utilizar como temporizador o contador.
- Conversor ADC de 10 bits.
- Puerto USART (Universal síncrono y asíncrono Transmisor Receptor).

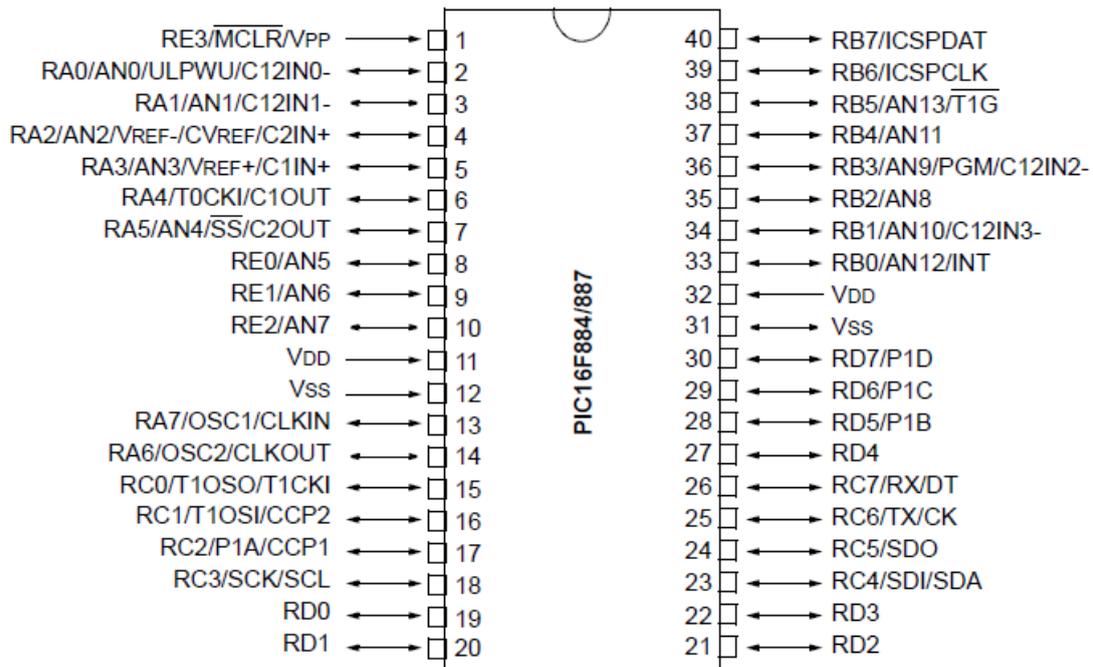


Figura 6.1: Microcontrolador PIC16F887A PDIP.

Fuente: ([18] Datasheet “Microchip PIC16F87X”, 28/40 Pin 8-Bit CMOS FLASH Microcontrollers.)

### 6.1.1 Asignación de pines

Se indica a continuación la asignación de cada uno de los pines del microcontrolador:

Entradas digitales:

- RB7: Sensor hall 1 del motor izquierdo.
- RB6: Sensor hall 2 del motor izquierdo.
- RB5: Sensor hall 3 del motor izquierdo.
- RB4: Sensor hall 1 del motor derecho.
- RB3: Sensor hall 2 del motor derecho.
- RB2: Sensor hall 3 del motor derecho.
- RC7 UART RX.

Entradas analógicas:

- RA0 Sensor de corriente motor izquierdo.
- RA1 Sensor de corriente motor derecho.

Salidas:

- RC0 HIN1 driver motor izquierdo.
- RC1 HIN2 driver motor izquierdo.
- RC2 HIN3 driver motor izquierdo.
- RC3 LIN1 driver motor izquierdo.
- RD0 LIN2 driver motor izquierdo.
- RD1 LIN3 driver motor izquierdo.
- RB1 HIN1 driver motor derecho.
- RD7 HIN2 driver motor derecho.
- RD6 HIN3 driver motor derecho.
- RD5 LIN1 driver motor derecho.
- RD4 LIN2 driver motor derecho.
- RC5 LIN3 driver motor derecho.
- RC6 UART TX.
- RC4 PWM motor derecho
- RD3 PWM motor izquierdo

## **6.2 Software implementado en PIC16F887A**

Para explicar el funcionamiento del código de control se realizó un esquema de secuencia (Figura 6.2).

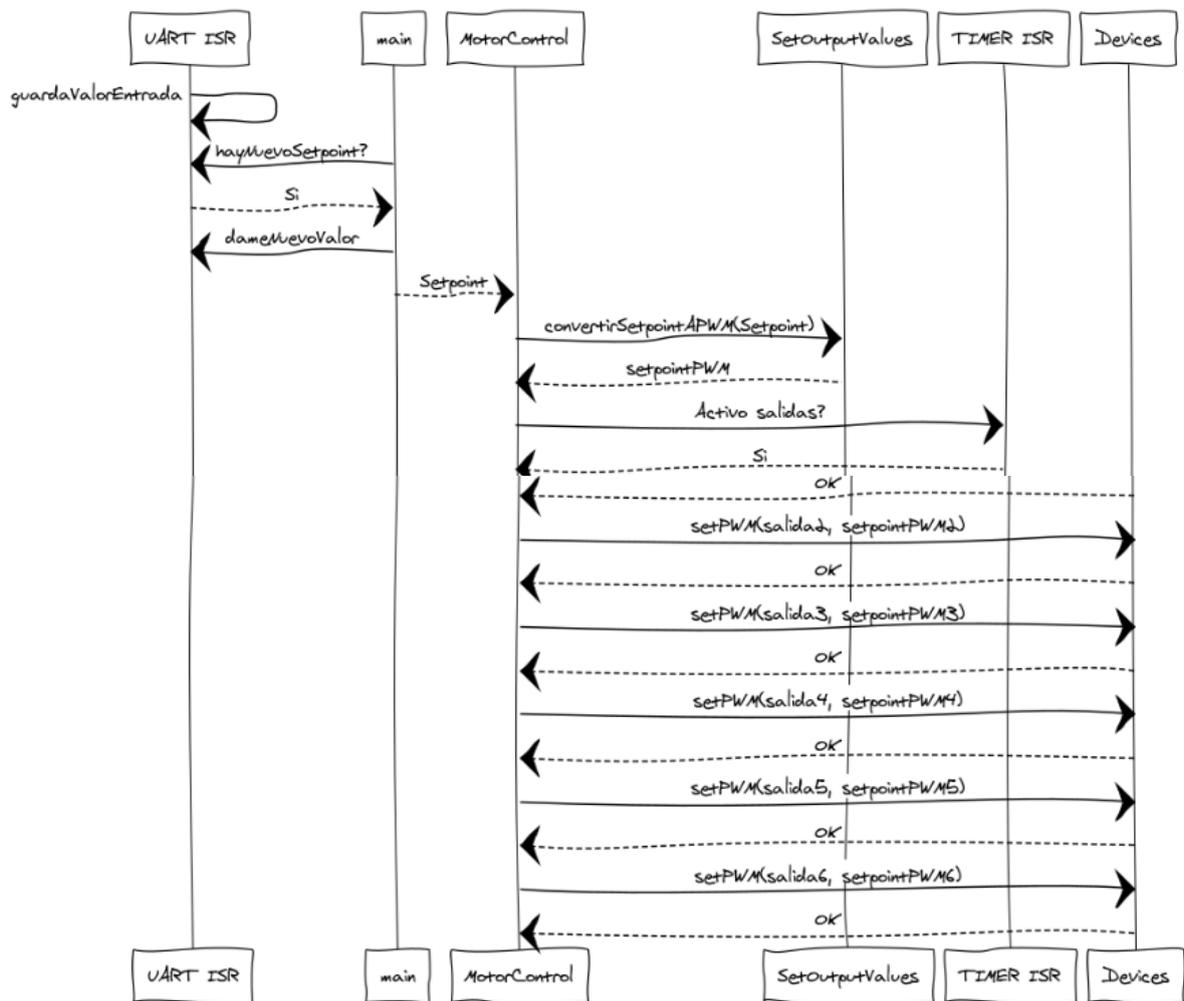


Figura 6.2: Diagrama de secuencia del software.

La función principal es la encargada de interpretar las acciones enviadas a través del módulo bluetooth y del sensado de corriente en cada uno de los motores.

La rutina de servicio de interrupciones se ocupa de atender el puerto UART que recibe los comandos del módulo bluetooth y de generar el PWM con el Timer 0 y el Timer 1.

La función MotorControl lee las señales de los tres sensores hall de cada

motor y les asigna un valor.

La función Device con la información de la dirección de giro del motor y el valor asignado por MotorControl activa las salidas correspondientes para que el motor siga girando.

### **6.3 Comunicación Bluetooth**

Para comunicar el microcontrolador y el módulo bluetooth HC-05 se utilizó el módulo USART del PIC 16f887.

USART, viene de receptor transmisor síncrono asíncrono universal, es una forma de comunicación entre dispositivos, donde los datos son enviados en grupos de 8 bits o de 9 bits bit por bit, esto es en serie, por eso se dice que esta es una comunicación serial.

Si la comunicación USART es asíncrona, uno de los hilos será para la transmisión de los datos de un dispositivo a otro y el otro hilo será para la recepción de datos entre un dispositivo a otro, la transmisión y la recepción pueden ocurrir en forma simultánea, lo que si se tiene que cumplir es que la frecuencia de trabajo de ambos dispositivos tiene que ser la misma, a esto se le conoce como los baudios que viene a ser la cantidad de bits por segundo que se transmitirán entre ambos dispositivos.

Si la comunicación USART es síncrona, uno de los hilos será utilizado tanto para la transmisión y la recepción de datos por lo que la transmisión no puede ocurrir en forma simultánea, el otro hilo será utilizado para enviar la señal de reloj de sincronización entre ambos dispositivos, en este caso uno de los dispositivos es llamado maestro y el otro esclavo, el maestro es el que controla la señal de reloj y cuando se inicia o finaliza la comunicación.

En este proyecto se utilizó la comunicación asíncrona, no se utiliza una señal de reloj y los datos se transmiten de forma muy simple como en la Figura 6.3.

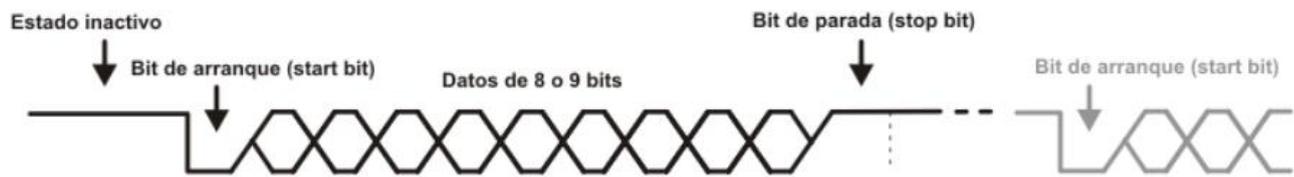


Figura 6.3: Comunicación asíncrona.

Fuente: ([27] Application Note – “Bluetooth module HC05 interfacing with pic microcontroller”)

Cada dato se transmite de la siguiente forma:

- En estado inactivo la línea de datos permanece en estado alto (1);
- Cada transmisión de datos comienza con un bit de arranque (START), el cual, siempre es cero (0);
- Cada dato tiene un ancho de 8 o 9 bits (primero se transmite el bit menos significativo - LSB);
- Cada transmisión de datos termina con un bit de parada (STOP), el cual, siempre es uno (1).

La Figura 6.4 muestra el pin out del módulo bluetooth.

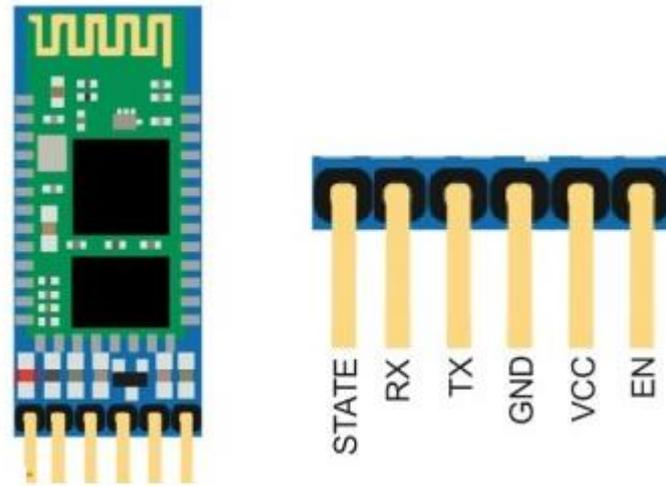


Figura 6.4: Pin out modulo bluetooth HC-05.

Fuente: ([27] Application Note – “Bluetooth module HC05 interfacing with pic microcontroller”)

Para establecer la comunicación entre el modulo bluetooth HC-05 y el dispositivo móvil se utilizó la aplicación “Bluetooth terminal HC-05” Versión 1.17.

El nombre del dispositivo es HC-05 y la contraseña para vincularlo es 1234 (Figura 6.5).

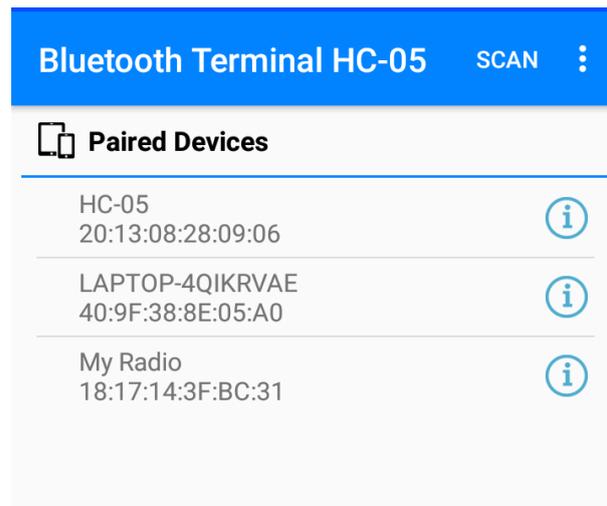


Figura 6.5: Pantalla conexión con Módulo HC-05.

En la siguiente figura se presenta la pantalla principal de la app para controlar el prototipo. El comando “A” es para avanzar hacia adelante, “R” retroceder, “I” giro a izquierda y “D” giro a la derecha.

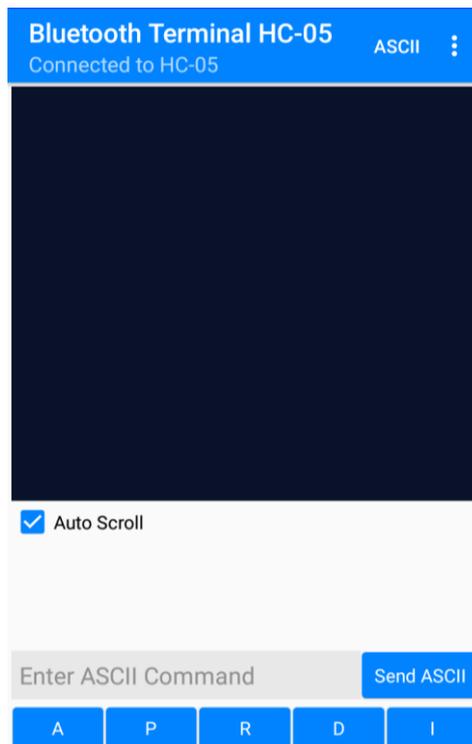


Figura 6.6: Pantalla principal “Bluetooth terminal HC-05”.

#### 6.4 Sensor de corriente

El ACS712 es un sensor de corriente tanto de alterna como continua, que permite medir la intensidad eléctrica que atraviesa un conductor.

Internamente el ACS712 consiste en un sensor hall de precisión y bajo offset junto con un canal de conducción localizado cerca de la superficie del integrado. Cuando la corriente fluye por el canal de cobre genera un campo magnético que es detectado por el sensor Hall y es convertido en una tensión.

La salida del sensor es una tensión proporcional a la corriente, y altamente independiente de la temperatura.

El camino conductor está aislado galvánicamente del IC garantizado un mínimo 2.1 kVRMS, su resistencia es muy baja del orden 1.2 mOhm, lo que se traduce en pequeñas pérdidas.

Existen modelos para rangos de 5A, 20A, 30A. El sensor soporta corrientes hasta 5x el rango de medición del sensor. Sobrepasar el límite dañara el ACS712.

El sensor utilizado en el proyecto es de 5A, que mide un rango de corriente comprendido entre -5A y 5A con una sensibilidad de 185mV/A.

El sensor nos entrega un valor de 2.5 voltios para una corriente de 0A y a partir de allí incrementa proporcionalmente de acuerdo a la sensibilidad, teniendo una relación lineal entre la salida de voltaje del sensor y la corriente. Dicha relación es una línea recta en una gráfica Tensión vs Corriente, donde la pendiente es la sensibilidad y la intersección en el eje Y es 2.5 voltios. La ecuación de la recta sería la siguiente:

$$V = m I + 2.5$$

Donde la pendiente es m y equivale a la Sensibilidad

Despejando tendremos la ecuación para hallar la corriente a partir de la lectura del sensor:

$$I = \frac{V - 2.5}{\text{Sensibilidad}}$$

## Capítulo 7- Diseño del circuito de potencia

El circuito de potencia está conformado por la etapa de aislación galvánica que protege la etapa de control de la potencia. El driver que es el encargado de activar los mosfet y por último el puente trifásico conformado por los mosfet que actúan como llaves electrónicas alimentando las distintas fases del motor brushless de flujo axial.

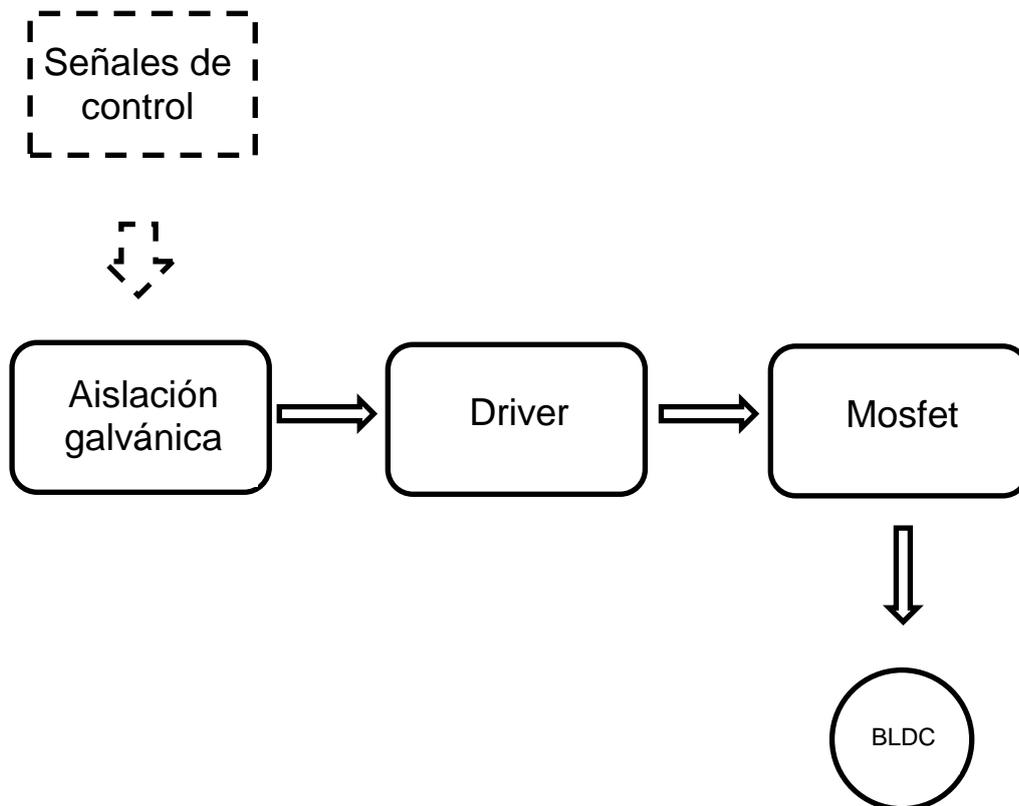


Figura 7.1: Módulo de potencia

### 7.1 Aislación galvánica

El módulo de aislación galvánica consiste en la división de partes funcionales dentro de un circuito permitiendo separar el bloque de control del bloque de potencia, mediante opto-acopladores.

Un opto-acoplador es un circuito integrado compuesto por un diodo led y un fototransistor unidos de tal forma que cuando una señal eléctrica circula a

través del led haciendo que brille, la luz que este emite es recibida por la base del fototransistor, permitiendo el paso de tensión aplicada en sus terminales. La liberación o no de la corriente de accionamiento a un dispositivo cualquiera es posible sólo por la emisión o no emisión de luz por el led emisor, por lo que no hay ningún contacto "físico" entre las partes, existiendo sólo la excitación óptica. Por lo tanto, como no hay ninguna conexión física, entre el LED emisor y el transistor detector, dentro del 4n25, el puerto paralelo quedará inmune a posibles eventos dañinos a su funcionamiento, siendo que, si estos ocurren sólo el 4N25 será afectado, y si el caso este llegar a ser dañado, el mismo puede ser cambiado sin mayores problemas (Figura 7.2).

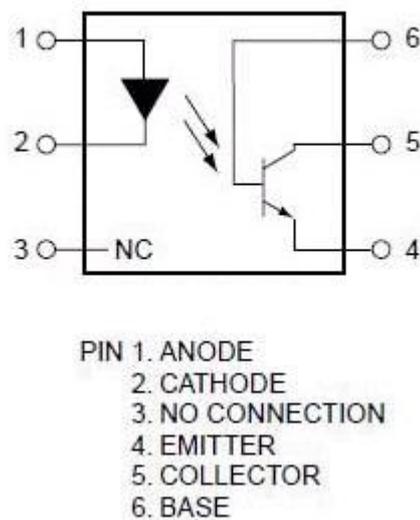


Figura 7.2: Opto-acoplador 4N25.

Fuente: ([28] Datasheet 4N25.)

A continuación, en la figura 7.3 se expone el circuito de conexionado del opto-acoplador mencionado anteriormente.

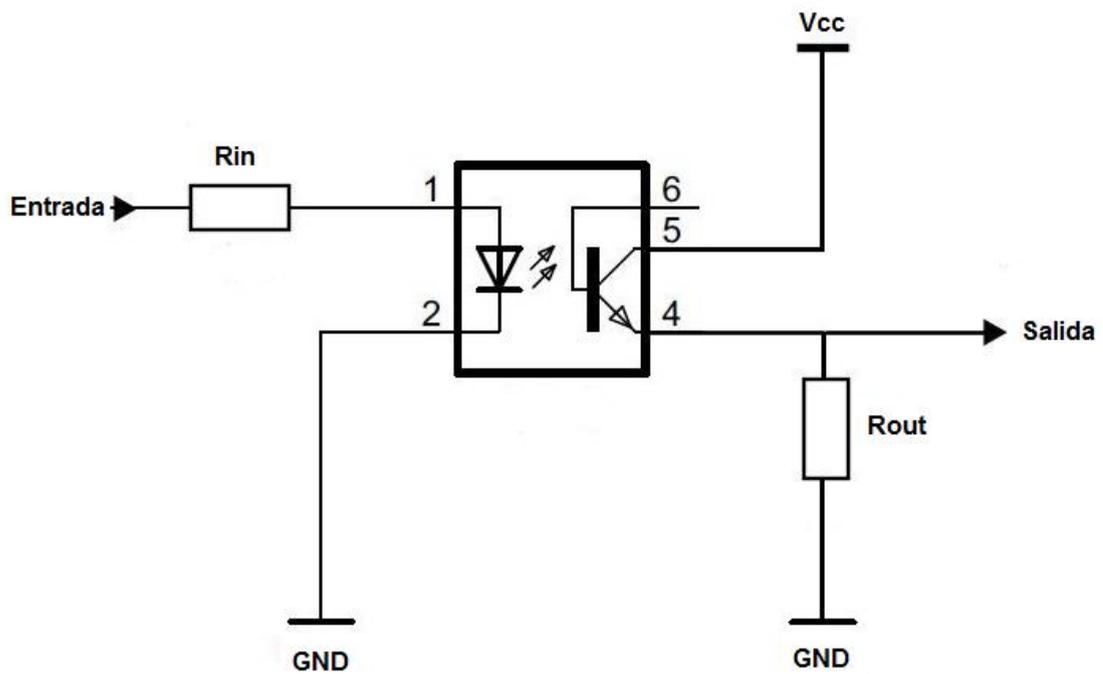


Figura 7.3: Circuito de conexión 4N25.

Fuente: ([28] Datasheet 4N25.)

Para calcular la resistencia  $R_{in}$  se utilizó la gráfica proporcionada por el fabricante (Figura 7.4).

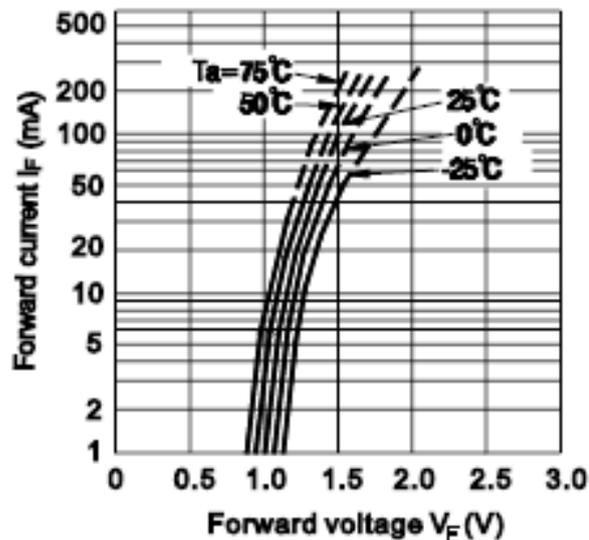


Figura 7.4: Gráfica polarización led del opto-acoplador.

Fuente: ([28] Datasheet 4N25.)

$$R_{in} = \frac{V_{CC} - V_R}{I} = \frac{5v - 1,4v}{25mA}$$

$$R_{in} = 144\Omega \cong 100\Omega$$

La salida es tomada del emisor y la configuración utilizada es un seguidor de emisor, por lo tanto la salida copia a la entrada, a diferencia de otra configuración donde la salida niega la entrada. Se colocó una  $R_{out} = 1\text{ K}\Omega$ .

## 7.2 Driver de activación de mosfet

Los mosfet son dispositivos controlados por tensión, para que operen en modo saturación la tensión entre el terminal de fuente (source) y el terminal de compuerta (gate) debe ser de aproximadamente 10 voltios.

En una configuración push-pull de mosfet de canal N, la fuente del transistor de la parte baja está referenciada a masa con lo cual no traería inconvenientes al momento de conducción en saturación, no así el mosfet de la

parte alta cuyo terminal de fuente, está referenciado al bus dc (Figura 7.5).

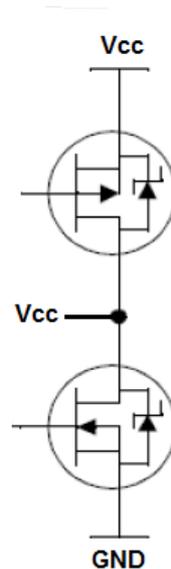


Figura 7.5: Configuración push-pull mosfet de canal N.

Fuente: ([22] Fuente: ([28] Application Note AN-6076, "Design and Application Guide of Bootstrap Circuit for High – Voltage Gate – Driver IC", By Fairchild Semiconductor.)

Para resolver este inconveniente y poder llevar adelante la conmutación de los mosfet de la parte alta, se utilizó el driver IR2110 que utiliza un circuito de bootstrap (Figura 7.6).



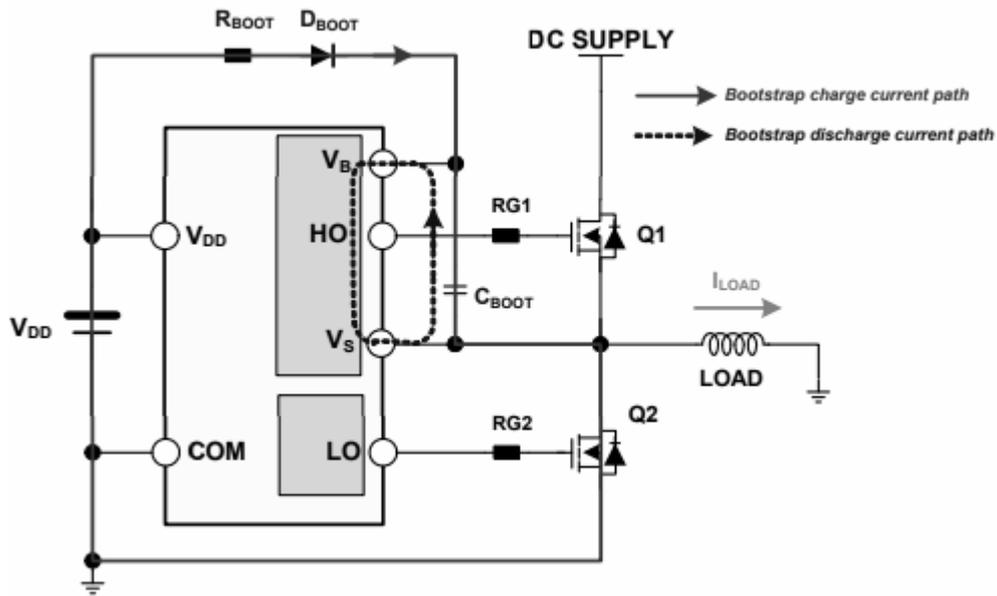


Figura 7.7: Circuito carga del capacitor  $C_{BOOT}$ .

Fuente: ([22] Fuente: ([28] Application Note AN-6076, "Design and Application Guide of Bootstrap Circuit for High – Voltage Gate – Driver IC", By Fairchild Semiconductor.)

A continuación se exponen los cálculos con los cuales se obtuvo el valor del capacitor  $C_{BOOT}$ .

$$C_{BOOT} \geq \frac{2[2Q_g + \frac{I_{gbs(max)}}{f} + Q_{is} + \frac{I_{cbs(leak)}}{f}]}{V_{CC} - V_f - V_{LS} - V_{min}}$$

$Q_g$ : valor de la carga del mosfet del lado alto.

$f$ : frecuencia de operación.

$I_{cbs(leak)}$ : corriente de fuga del capacitor bootstrap.

$I_{gbs(max)}$ : máxima corriente inactiva.

$V_{CC}$ : tensión de alimentación del IR2110.

$V_f$ : caída de voltaje en el diodo  $D_{BOOT}$ .

$V_{LS}$ : caída de voltaje a través del mosfet del lado bajo.

$V_{min}$ : tensión mínimo entre los pines  $V_b$  y  $V_s$ .

$Q_{IS}$ : nivel de carga requerida por ciclo.

El valor de carga ( $Q_g$ ) lo encontramos en la hoja de datos de MOSFET que utilizemos. El proceso es posicionarse en la gráfica de carga vs tensión de gate. Como la tensión en la base de los MOSFETS es de 12V, vemos qué valor de carga corresponde el valor de esta tensión (Figura 7.8).

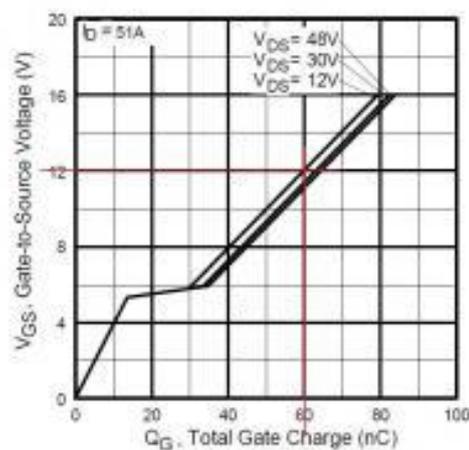


Figura 7.8: Grafica  $V_{GS}$  vs  $Q_g$ .

Fuente: ([22] Fuente: ([28] Application Note AN-6076, “Design and Application Guide of Bootstrap Circuit for High – Voltage Gate – Driver IC”, By Fairchild Semiconductor.)

Por lo tanto el valor de esta variable para este ejemplo es de 60nC.

La frecuencia (f) de operación la podemos elegir a 20Khz. Esta corriente se toma como cero si el capacitor a seleccionar es cerámico. Por lo tanto podemos ignorar esta variable.

Los valores de estas variables vienen dadas en la hoja de datos del IR2110, los cuales son  $I_{qbs} = 230\mu A$  y  $Q_{Is} = 5nC$ . Es necesario aclarar que los 5nC se deben a que el driver va a tener menos de 600V flotantes.

La tensión de alimentación es de 12 V.

Se toma el valor de 0.7V de caída de tensión del 1n4148.

Esta tensión es el valor de la caída de tensión en el MOSFET del lado bajo. Idealmente se toma como la corriente multiplicada por su resistencia interna, la cual es muy baja. Sin embargo, tomo el valor de 0.7V, como si fuera un diodo, para darle un margen de error un poco más grande.

Este valor es la tensión mínima para excitar la base del MOSFET. Como en la figura de tensión vs carga el valor mínimo para que el MOSFET conduzca plenamente es de 8V, podemos dejarle un valor de 10 para garantizar que el MOSFET va a conducir de forma apropiada.

Sustituyendo los valores de las variables tenemos que el valor del capacitor es:

$$C > (2 * [ 2*(30nC) + (230uA / 1Khz) + 5nC]) / (12v - 0.7 - 0.7 - 10V)$$

$$C > (590nC / 0.6V)$$

$$C > 983,33nF$$

Por tanto el capacitor bootstrap debe ser mayor a 1uF.

### 7.2.1 Pin out driver ir2110.

Las características del driver de la Figura 7.9, se enumeran a continuación.

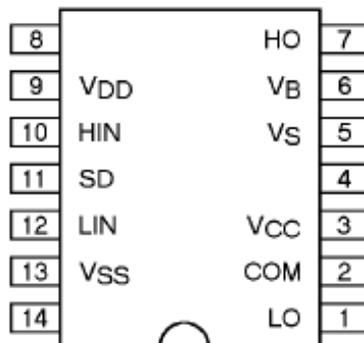


Figura 7.9: IR2110

Fuente: ([16] Datasheet IR2110.)

- Pin 1 es la salida de la unidad MOSFET del lado bajo.
- Pin2 es una ruta de retorno para el lado bajo. Tiene el mismo potencial que el pin VSS de tierra 13. Debido a que cuando la entrada al lado bajo en el pin 12 Lin es alta, la salida LO será igual al valor de la tensión Vcc en el pin 3 con respecto a Vss y al pin COM. Cuando la entrada de Hen al lado bajo en el pin 12 Lin es baja, la salida de LO será igual al valor de VSS y su medio cero.
- Pin 3 Alimentación.
- Pin 5 Retorno de la fuente flotante.
- Pin 6 de VB se usa como un circuito flotante de alta potencia o como circuito flotante para proporcionar tensión flotante al MOSFET del lado alto.
- Pin 7 HO es la salida de la unidad MOSFET del lado alto.
- Pin 9 de VDD es un pin de suministro de inicio de sesión. Su valor debería ser de entre 5 voltios. Pero si usamos tensión de menos de 4 voltios, muchos no te darán el resultado requerido.
- Pin10 HIN es una señal de entrada para la salida del controlador mosfet del lado alto. Puede ser desde un microcontrolador o cualquier otro dispositivo. Pero el nivel lógico de la señal de entrada debe estar entre 4-5 voltios.
- Pin 12 LIN es una señal de entrada para la salida del controlador mosfet del lado bajo. Puede ser desde un microcontrolador o cualquier otro dispositivo. Pero el nivel lógico de la señal de entrada también debe estar entre 4-5 voltios.
- Pin 11 SD se utiliza un pin de apagado. Se puede usar para circuito de protección. Por ejemplo, en un circuito de protección de sobretensión o sobretensión, si alguno de estos valores supera los valores especificados, puede dar una señal de 5 voltios para apagar el controlador IR2210 para detener la conducción de MOSFETS. A cambio tu circuito dejará de funcionar.

### 7.3 Inversor

El objetivo de un inversor trifásico es generar energía eléctrica de corriente alterna a partir de una fuente de energía de corriente continua, con magnitudes y frecuencias deseadas. Se constituye por dispositivos electrónicos de potencia, que trabajan como interruptores operando en corte y saturación con una secuencia apropiada para obtener tres tensiones de salida simétricas y balanceadas. Los dispositivos electrónicos que se utilizaron son los Mosfet IRF630, cuyas características principales se presentan a continuación:

Tipo de Canal	N
Corriente Máxima Continua de Drenaje	9 A
Tensión Máxima Drenador-Fuente	200 V
Resistencia Máxima Drenador-Fuente	400 mΩ
Tensión de umbral de puerta máxima	4V
Tensión de umbral de puerta mínima	2V
Tensión Máxima Puerta-Fuente	-20 V, +20 V
Tipo de Encapsulado	TO-220
Categoría	MOSFET de potencia
Disipación de Potencia Máxima	75 W
Temperatura Máxima de Funcionamiento	+150 °C
Material del transistor	Si
Tiempo de Retardo de Encendido Típico	10 ns

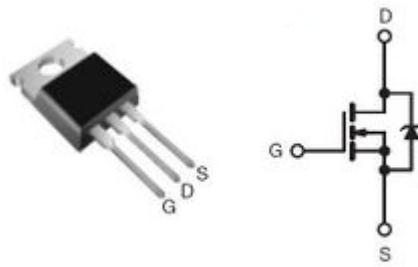


Figura 7.10: Mosfet IRF630.

Fuente: ([19] Datasheet IRF630.)

La Figura 7.10 muestra la topología de un inversor trifásico en puente completo, el cual se componen de seis mosfet, cada uno con un diodo en conexión inversa, empleados para conducir la corriente reactiva de retorno a la fuente de tensión. Estos inversores se dividen según su forma de operar y en este caso se optó por el de conducción a  $120^\circ$ , donde se activan de a dos dispositivos a la vez.

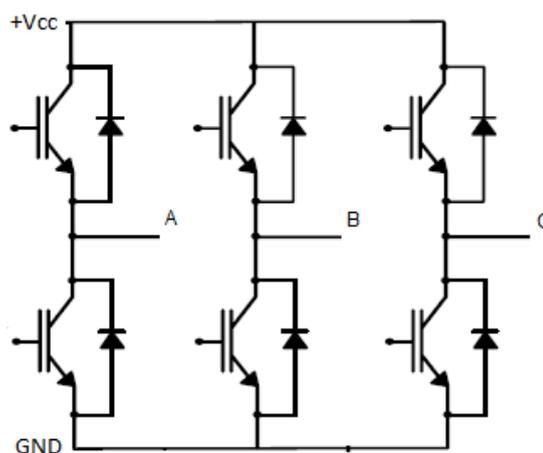


Figura 7.11: Topología inversor conducción  $120^\circ$ .

Fuente: ([10] Application Note AN047, "Brushless DC Motor Fundamentals".)

A la hora de conmutar los mosfet es muy importante tener en cuenta que no pueden activarse dos mosfet de la misma rama ya que generaría un cortocircuito pudiendo ocasionar la ruptura de los mismos. Si bien la secuencia de conmutación que generemos no haría que conduzca dos mosfet de la misma rama a la vez es importante entre cada conmutación generar un tiempo muerto (dead time) para asegurarnos de que los mosfet han sido apagados. Este tiempo muerto se realizó por software.

## Capítulo 8 - Descripción del modelo experimental

El prototipo final cuenta con un microcontrolador PIC 16F887A el cual interpreta y procesa las ordenes enviadas desde el celular por vía bluetooth y las señales proveniente de los sensores hall de los motores, para luego hacer funcionar los motores a través de las placas de potencia respectivas. El sistema se encuentra alimentado por una batería lipo de 11.1 V y 1300 mA. Y cuenta con una llave de encendido colocada en el lateral derecho.

Su peso total es de 2,330 kg y alcanza una velocidad aproximada de 0.10 m/s (36 km/h).



Figura 8.1: Prototipo final

Para llevar adelante las mediciones el prototipo se coloca sobre una base como se muestra en la siguiente figura.

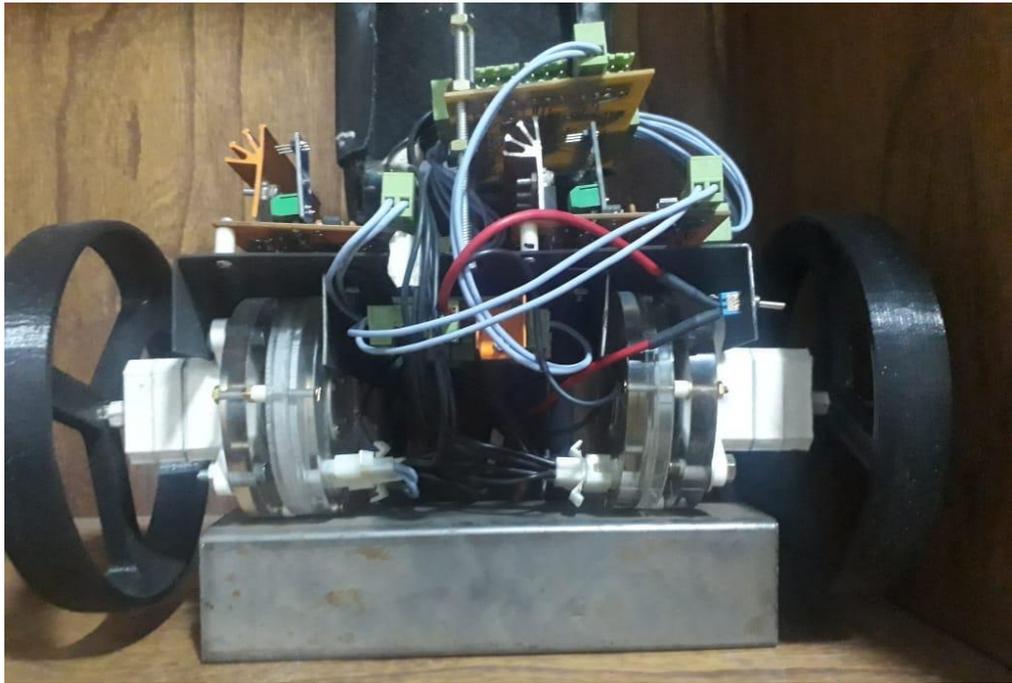


Figura 8.2: Base de apoyo para realizar mediciones.

En la placa de pruebas se puede medir la tensión de la batería, la tensión de alimentación de las placas, la tensión en los sensores, la tensión entre las fases de los motores y el pulso pwm que se inyecta en los mosfets de las placas de potencia que comandan los motores BLDC.

En la siguiente imagen se puede apreciar dos de las señales de los sensores hall de uno de los motores.

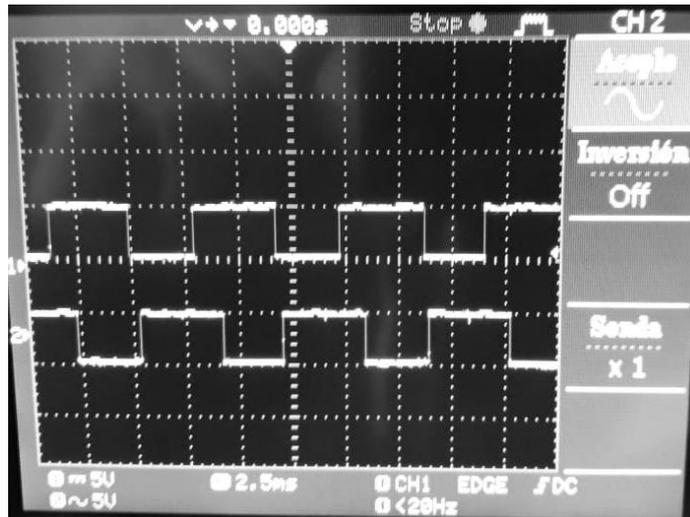


Figura 8.3: Señal sensores hall.

A partir de las señales de los tres sensores hall que tiene cada uno de los motores se genera una secuencia apropiada de excitación de las fases del motor que hacen girar al mismo.

En la figura 8.4 se pueden visualizar las tensiones entre fases del motor.

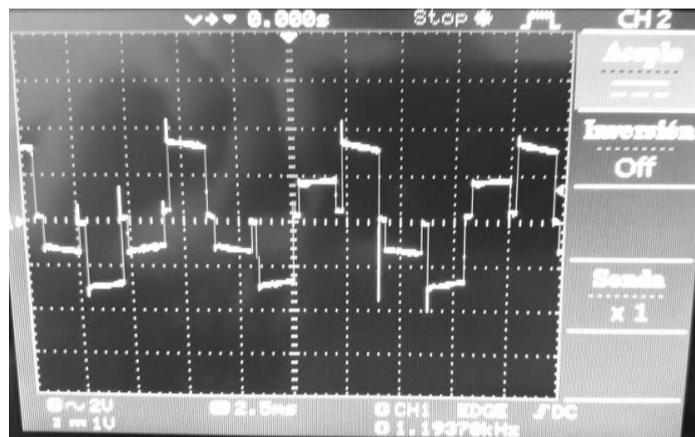


Figura 8.4: Tensión entre las fases del motor.

En los pines de Salidas M1 y Salida M2 se puede observar las tensiones

PWM que excitan a los mosfet del inversor, como se mencionó anteriormente se activaran de a dos mosfets a la vez, es decir la corriente fluirá en dos de las tres fases al mismo tiempo, según la secuencia establecida por los sensores hall.

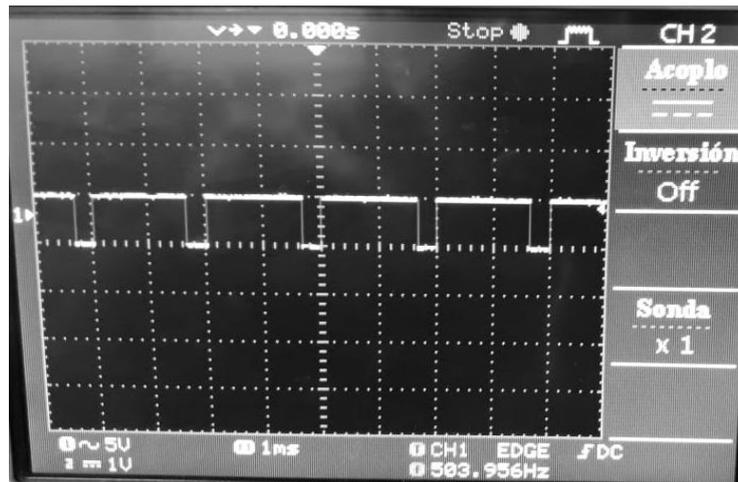


Figura 8.5: Tensión PWM aplicada a los mosfets.

En la figura anterior se puede observar el ciclo de trabajo o duty cicly en este caso es de aproximadamente de 90%, esto se debe a que los motores son exigidos al máximo para vencer la inercia de las cajas reductoras y así poder hacer mover el prototipo lo que no deja margen para variar la velocidad de la misma.

En principio la idea original era no utilizar cajas reductoras, las ruedas se acoplaban directo a los motores, pero luego de terminar las etapas de alimentación, control y potencia cuando los motores comenzaron a funcionar y comencé a interpretar el funcionamiento de dichos motores, se hizo necesario colocar las cajas reductoras.

Se realizó un recorrido donde se llegó a una velocidad máxima de 0.1 m/s con un consumo de corriente de 1,2 A. Se observó que los motores van muy exigidos y la autonomía no es impuesta por la capacidad de la batería si no por el calentamiento que provocan los componentes de la placa de potencia.

## Conclusiones

La realización de este proyecto me han dejado múltiples enseñanzas que han surgido en el transcurso de su desarrollo.

A lo largo de este trabajo se consiguió establecer relaciones entre las diferentes áreas de la carrera, llevando a la práctica conceptos de control, de potencia y de programación.

El proyecto consta de dos partes: la primera relacionada al área de la mecánica, siendo esta la que presento mayores dificultades, demandando más tiempo al programado. La misma consistió en diseñar y construir la estructura del prototipo, el armado de uno de los motores y la puesta en marcha de las cajas reductoras. La segunda netamente electrónica, donde se logró diseñar y armar el prototipo electrónico que consta de una etapa de alimentación, una de potencia y una de control capaz de hacer funcionar los motores sin escobillas de flujo axial y establecer una comunicación bluetooth para comandar los mismos.

A pesar de los inconvenientes en la parte mecánica que hicieron necesario el agregado de las cajas reductoras y su posterior puesta en marcha se cumplió con el objetivo de hacer traccionar el mini prototipo de sillas ruedas, logrando el movimiento hacia adelante, hacia atrás y giro sobre su propio eje llegando a una velocidad máxima de de 0.10 m/s (36 km/h).

. Teniendo en cuenta las cualidades de estos motores y su forma compacta con un buen dimensionamiento se pueden desarrollar motores de este tipo para para colocar en sillas de ruedas de escala real.

Por último, es de gran importancia destacar el aporte que realiza este proyecto a las materias de Electrónica Industrial y Electrónica Industrial Avanzada para el estudio de Motores brushless de flujo axial, resaltando que dichas conclusiones no son definitivas si no que abren el camino a futuras mejoras.

## Bibliografía

1. Dr Duane Hanselman, "Brushless Permanent Magnet Motor Design", Segunda edición. 2003.
2. Katsuhiko Ogata. "*Modern Control Engineering*". 5th Edition. Prentice Hall, 2010
3. Stephen J. Chapman, "Maquinas Eléctricas" (Tercera Edición – Editorial Mc Graw Hill).
4. Muhammad H. Rashid (Primera Edición 1995 por Prentice Hall Hispanoamericana, S.A. México). "Electrónica de Potencia"- Circuitos, dispositivos y aplicaciones – Segunda Edición.
5. H. Tabu, D. Schilling (Ed. Marcombo 1984), "Electrónica Digital Integrada".
6. García. M, Gómez. C (Tercera Edición), "Componentes y Materiales Electrónicos". (Capitulo 10 Inductores y Transformadores). Editorial: DOSSAT, S.A.
7. Jesús Fraile Mora, "Maquinas Eléctricas" (Quinta Edición – Editorial Mc Graw Hill). 2003.

## Referencias

8. Application Note AN885 Microchip, "Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals" by Padmaraja Yedamale, Microchip Technology Inc. 2003.
9. Application Note AN857 Microchip, "Brushless DC Motor Control Made Easy" By Ward Brown, Microchip Technology Inc. 2002.
10. Application Note AN047, "Brushless DC Motor Fundamentals".
11. Reinaldo González Reyes, "Accionamiento de Motor DC Brushless por Modulación de Ancho de Pulso".
12. Moreno M., Gustavo A. Pérez V., Milagros V. "Diseño concurrente de sillas de ruedas para minusválidos".
13. Fernando Romera Juarez, "Vehículo eléctrico biplaza asistencial".
14. Alastre Carballo Enrique. Arias Cabello Hector. "Silla-Banco con altura ajustable y programmable".
15. Datasheet PIC16F887.
16. Datasheet IR2110.
17. Datasheet UGN3132.
18. Datasheet "Microchip PIC16F87X", 28/40 Pin 8-Bit CMOS FLASH Microcontrollers.
19. Datasheet IRF630.
20. Datasheet ACS712.
21. General Purpose Type Photocoupler LTV-4N25 Series.
22. Application Note AN-6076, "Design and Application Guide of Bootstrap Circuit for High – Voltage Gate – Driver IC", By Fairchild Semiconductor.
23. Application Note – "Power Mosfet" By Renesas Electronics Corporation.
24. Application Note AN-978, "HV Floating MOS – Gate Driver IC's", By International Rectifier.

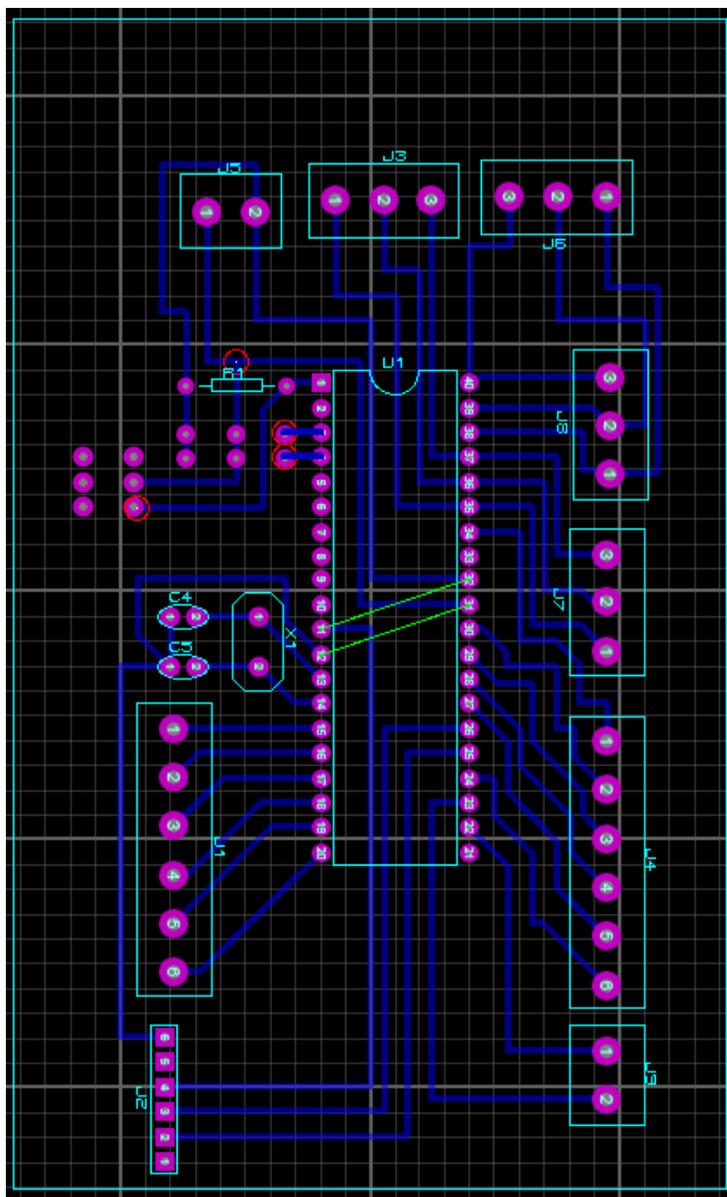
25. Electric Energy Magazine N° 4.

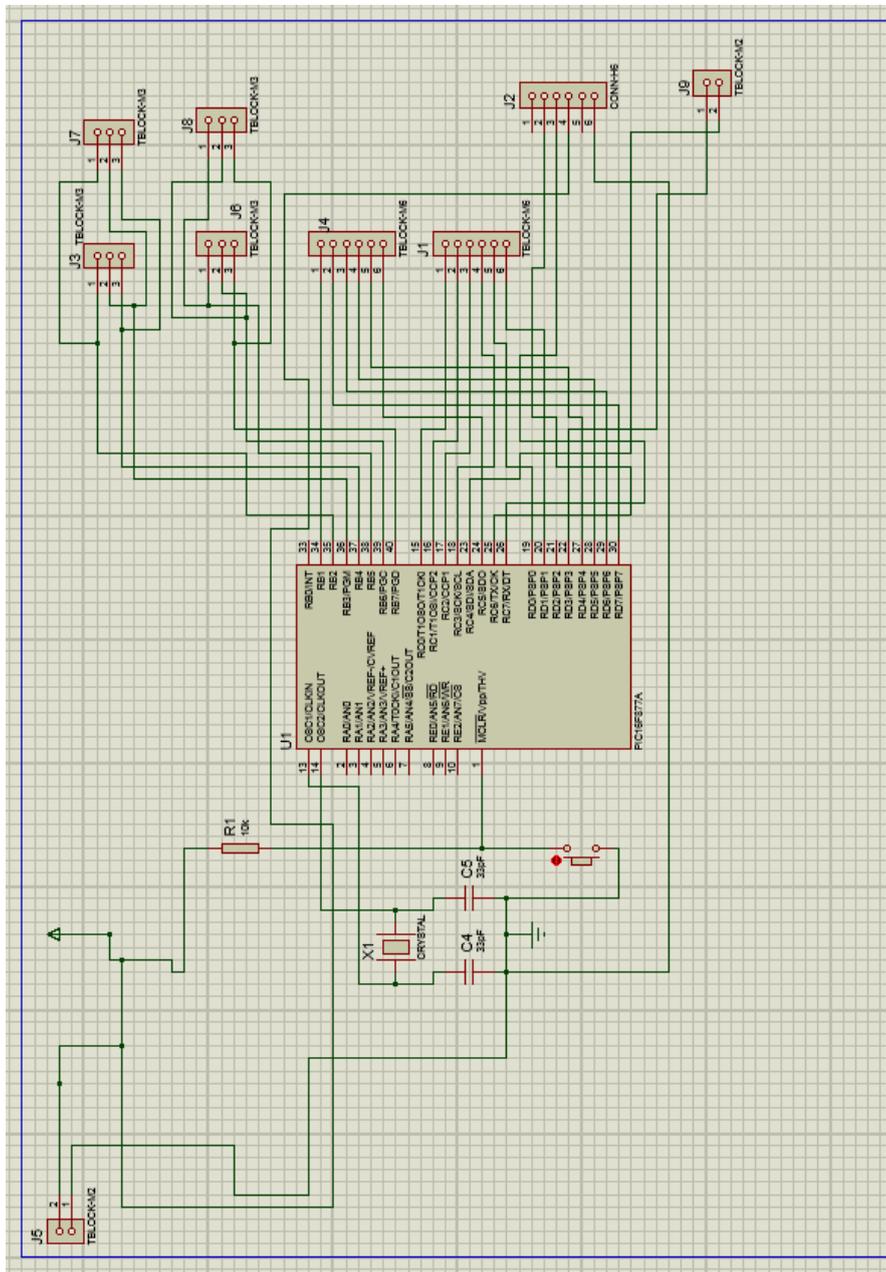
26. Raúl S. Cacace,” Diseño, simulación y construcción de un motor plano de flujo axial con imanes de (Nd-Fe-B) y bobinas impresas”

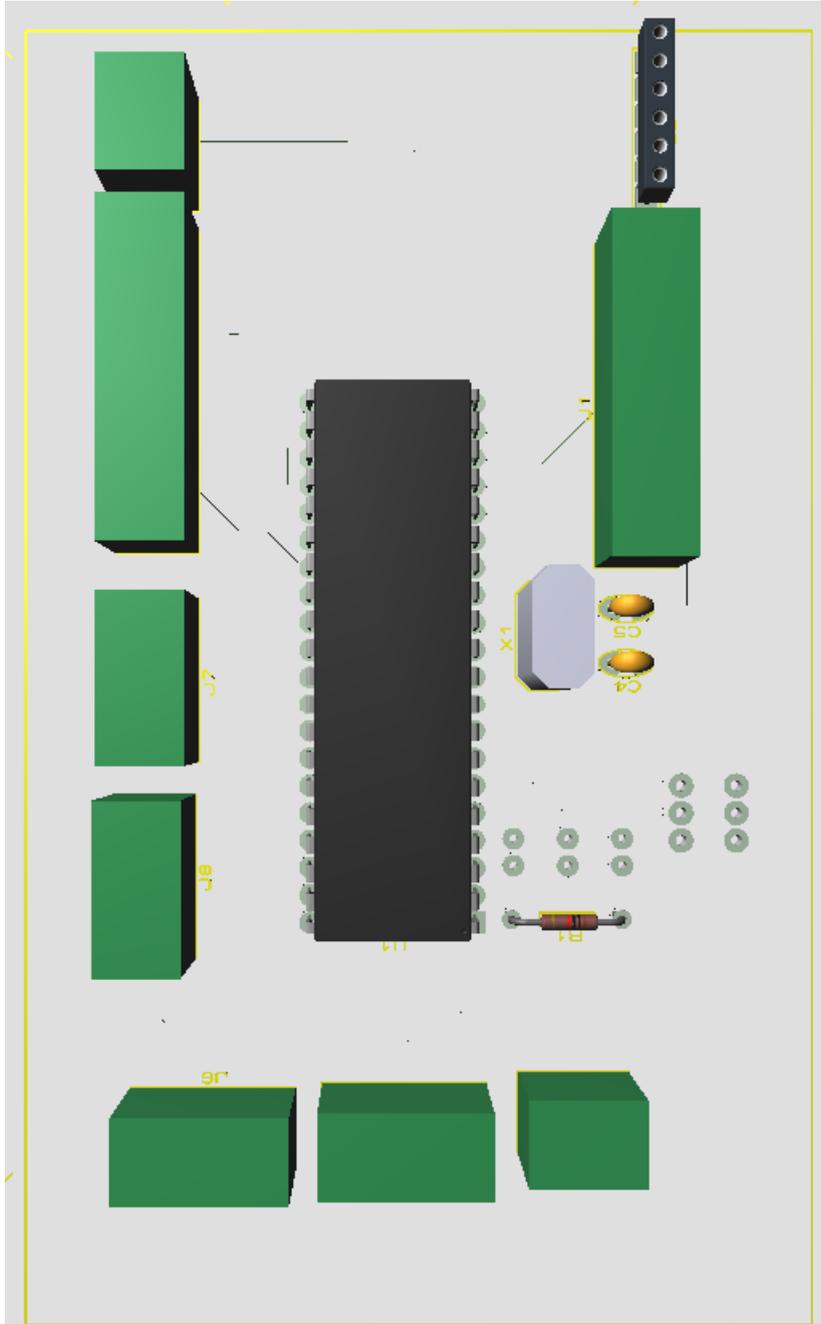
27. Application Note – “Bluetooth module HC05 interfacing with pic microcontroller”.

28. Datasheet 4N25.

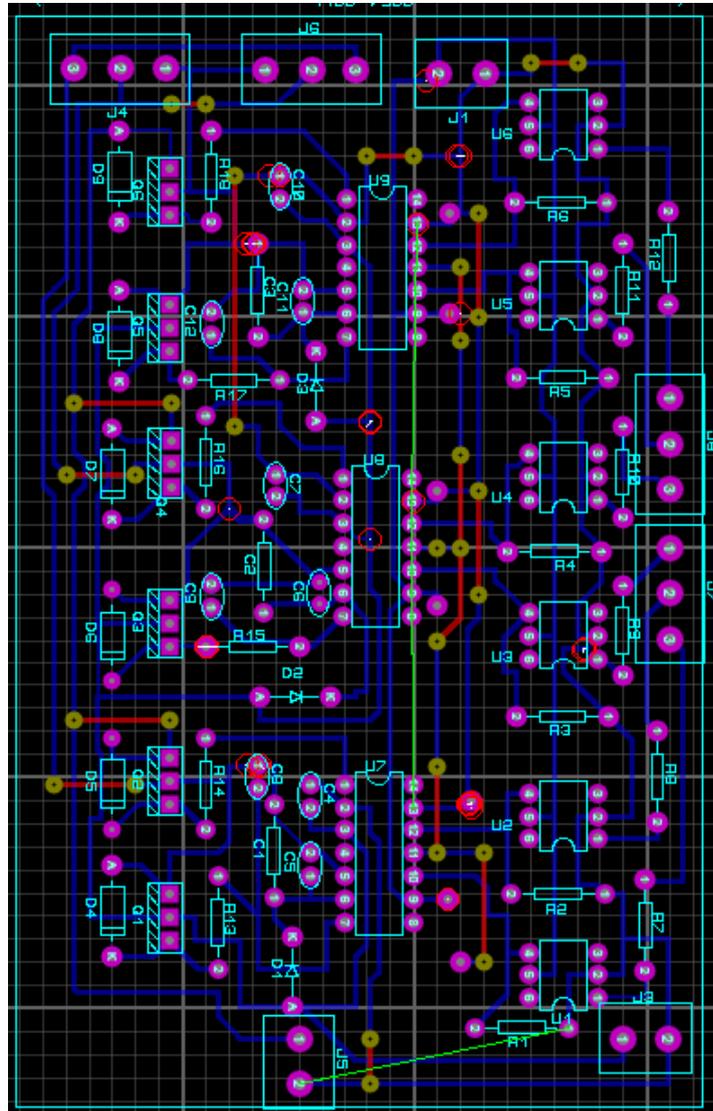
## Anexo I- Layout placa de control



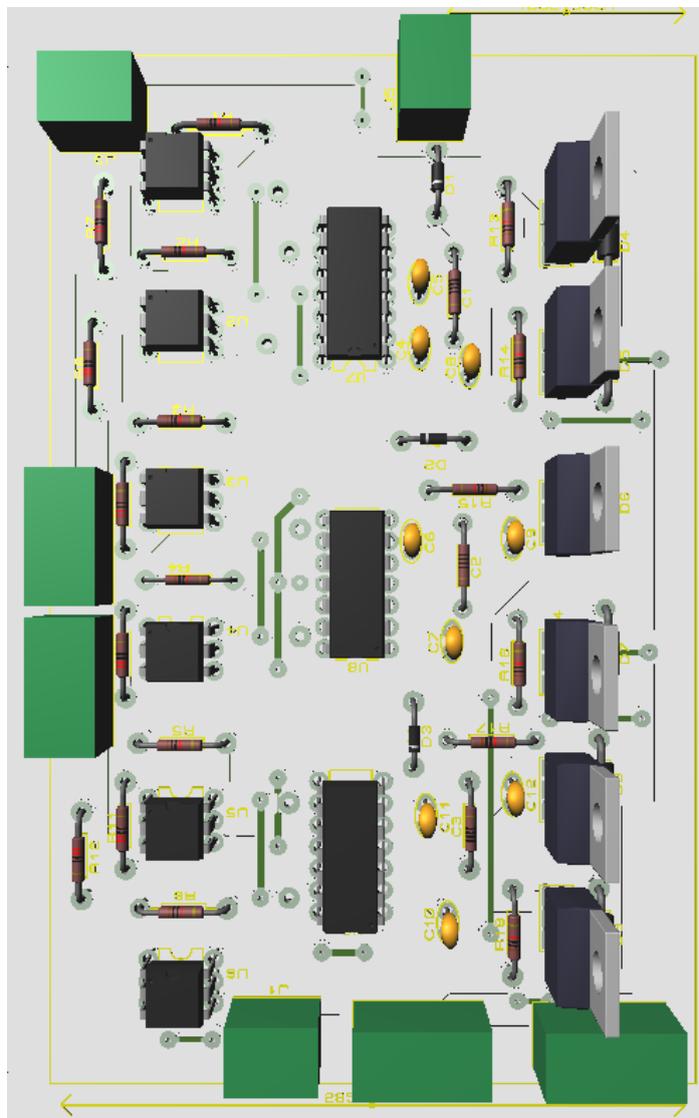




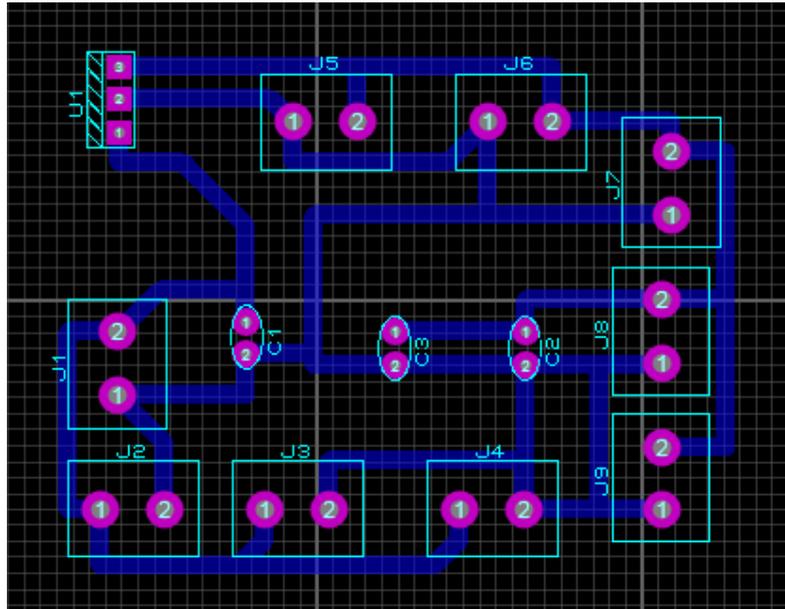
## Anexo II- Layout placa de potencia

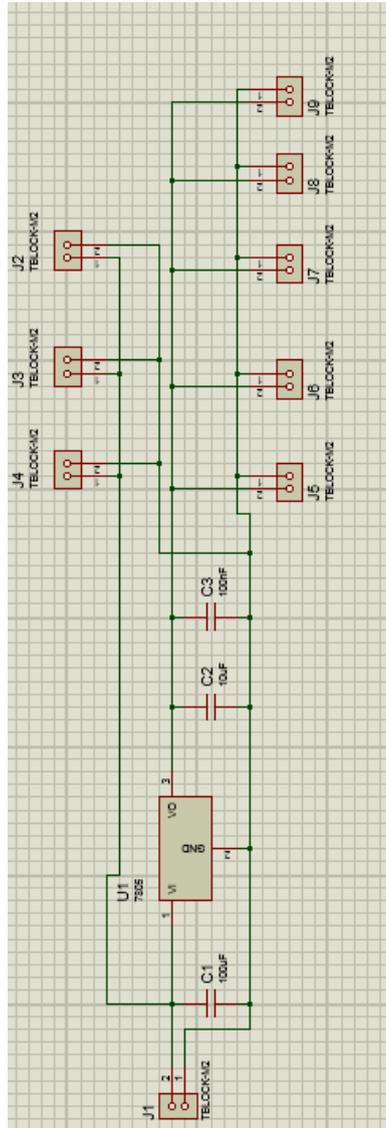


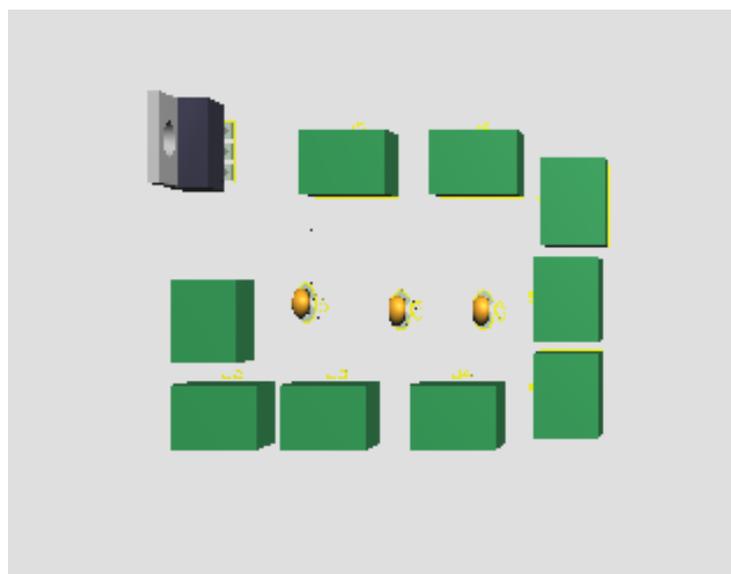




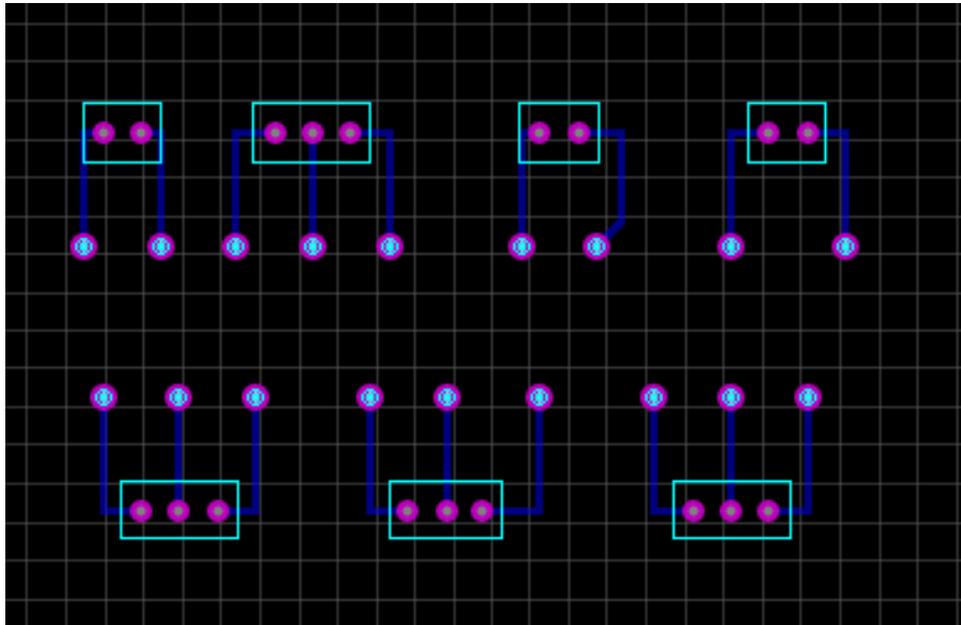
## Anexo III- Layout placa de alimentación

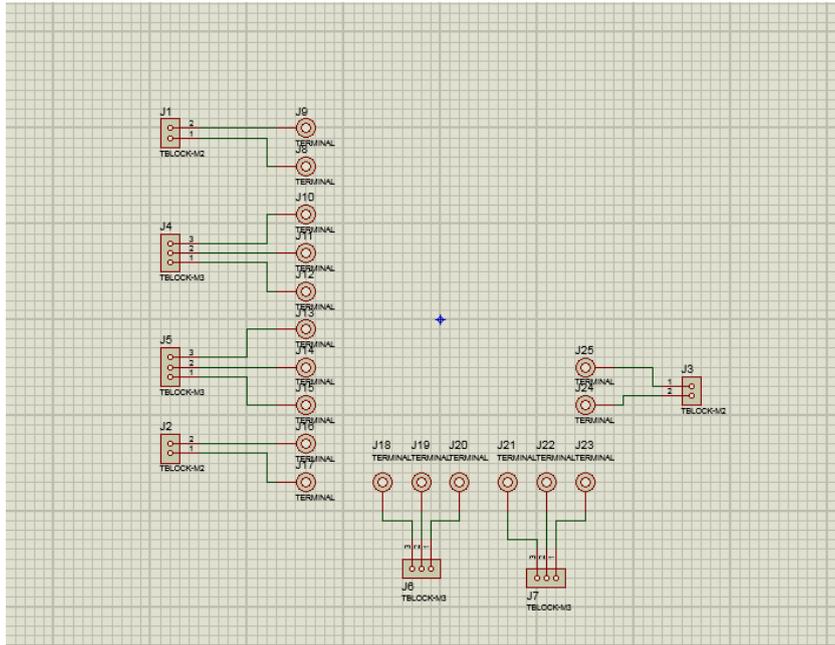






## Anexo IV- Layout placa de mediciones







## **Anexos del Proyecto Integrador**



**Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**

**AREA INGENIERÍA**

**ESCUELA DE ELECTRONICA**

**C.C. 755 - Correo Central - 5000 - CÓRDOBA**

Tel. Directo (0351) 33-4147 int 110

Conmutador: 433-4141 y 33-4152 - Interno 10

---

Sr.:

Cátedra PROYECTO INTEGRADOR

Atn. Prof. Ing. OSCAR A. CÁCERES

---

Me dirijo a Ud. a fin de solicitar la aprobación del tema del *Proyecto Integrador (PI)* que propongo a continuación:

**TEMA**

Nombre: Mini prototipo silla de ruedas con motores brushless de flujo axial.  
Supervisión y control.

Descripción: **Ver Anexo I**

Desarrollo del prototipo: **sí**

**DIRECTOR DE PROYECTO**

Nombre: Ing. Adrián Agüero

Cargo: Director

Dirección Personal o Laboral: Av. Velez Sarsfield 1611 – C.P. X5000EAS – FCEFyN  
- UNC –

TE: +54 351 4334147 int. 109

Firma del Director / Co Director:

**DATOS DEL ALUMNO**

Nombre y Apellido: Juan Ignacio Gallini

Matrícula: 33723966

Materias que faltan aprobar:-

Dirección Calle: Balcarce Nº 584 Barrio: Nueva Córdoba Localidad: Córdoba  
CP:5000

Tel: - Cel: (02333) 15413086

e-mail:juanignaciogallini@gmail.com

Firma:

### **OBJETIVO**

Es el de desarrollar un prototipo a escala de una silla de ruedas propulsada con dos motores brushless de flujo axial.

Este prototipo contara con un microcontrolador encargado de controlar el circuito de potencia que accionaran los motores de acuerdo a la señal que reciba desde el celular. Dicho sistema será alimentado con una batería.

Se adoptara como objetivo y criterio de diseño, realizar una máquina robusta y compacta para realizar estudio de laboratorio, que además, sus componentes sean fácilmente intercambiables por repuestos que se encuentran en el mercado.

Duración y fases de las tareas previstas: En el ANEXO II, se presenta un diagrama a este efecto.

### **METODOLOGÍA**

**Lugar previsto de realización:** Pañol de electrónica.

#### **Requerimiento de Instrumental y equipos**

Equipos de medición del Laboratorio de Electrónica, equipos de programación, y simulación, dos motores brushless de flujo axial controlable por ancho de pulso, placa de potencia, placa de control, celular y batería.

**Inversión estimativa prevista por el alumno.** \$18800

**Apoyo Económico externo a la Facultad :** \$12600

#### **Referencias Bibliográficas o de Software:**

Apuntes de Curso Electrónica Industrial dictado por el Ingeniero Adrián Agüero.  
Tutoriales de programación en C. Proyecto integrador Diseño, simulación y construcción de un motor plano de flujo axial con imanes de (Nd-Fe-B) y bobinas impresas de Raúl S. Cacace (1996)

.....

Firma del alumno

.....

Fecha

## ANEXO I

### **DESCRIPCIÓN Y DESARROLLO DEL PROYECTO: MINI PROTOTIPO SILLA DE RUEDAS CON MOTORES BRUSHLESS DE FLUJO AXIAL. SUPERVISION Y CONTROL.**

Este prototipo realizado a escala contara con dos motores brushless de flujo axial que darán tracción a cada una de las ruedas traseras de la silla.



El sistema de control estará conformado por un microcontrolador PIC 16F877 donde ingresan las señales provenientes de los sensores de posición del motor, sensores de corriente y se genera la secuencia necesaria para la conmutación del módulo de potencia. El mismo está formado por mosfets y se diseñara una placa de potencia modular para el control de los dos motores.

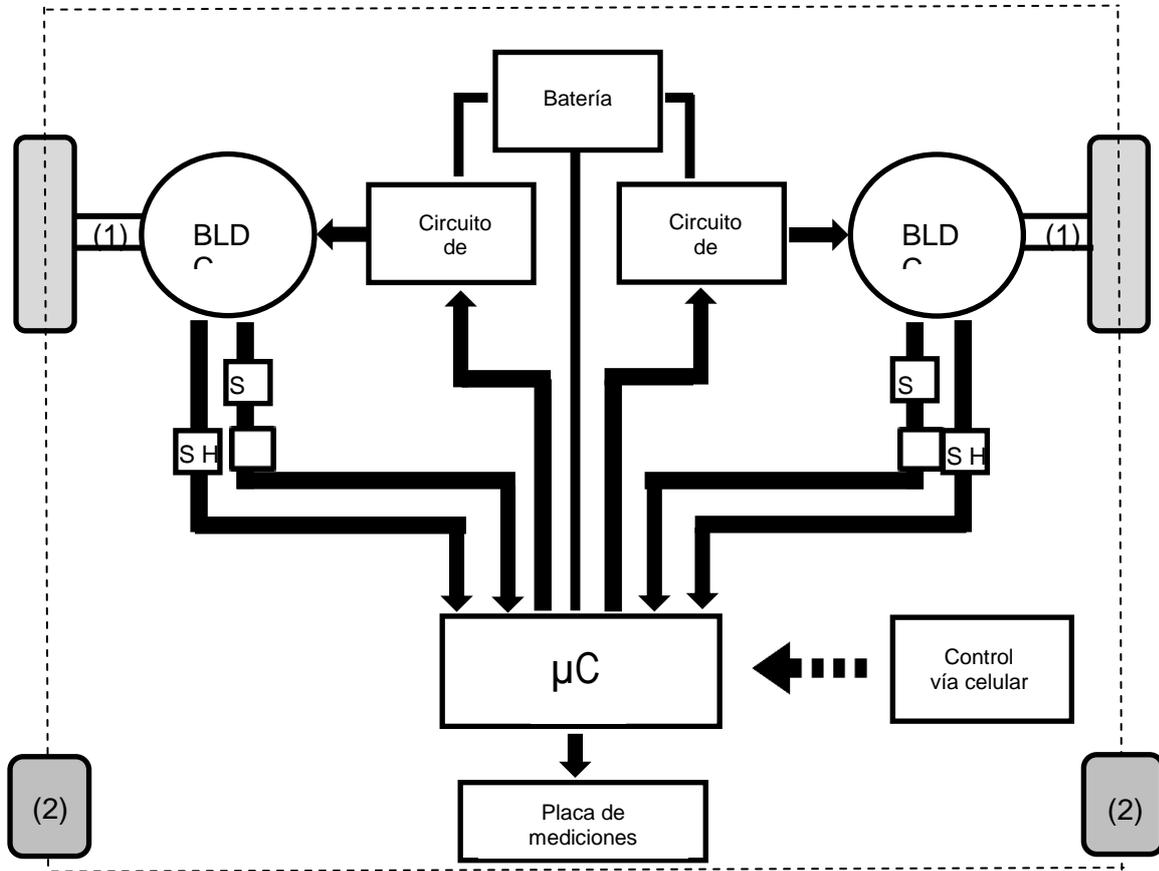
Además contará con una interfaz inalámbrica vía celular para la programación de los perfiles de velocidad y dirección.

Se dispondrá de una placa de mediciones de diferentes parámetros eléctricos como:

- Tensión de la batería
- Tensiones en las fases de los motores
- Tensión de activación de mosfet

Estos permitirán estudiar las variaciones de los mismos ante diferentes condiciones de funcionamiento del sistema.

Se estableció como criterio de diseño, la construcción de un prototipo robusto y compacto, con la intención de servir de base de estudio para la Cátedra de Electrónica Industrial e Electrónica Industrial Avanzada.



**Nota**

BLDC: Motor de corriente continua sin escobillas

SH: Sensor hall

SC: Sensor de corriente

(3) Acople directo motor-rueda

(4) Rueda pivotante

## Anexo II

Mes	Primero				Segundo				Tercero				Cuarto				Quinto				Sexto			
Semana	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1																								
2																								
3																								
4																								
5																								
6																								
7																								
8																								
9																								

- 1- Revisión bibliográfica
- 2- Diseño circuito de potencia
- 3- Programación  $\mu$ C
- 4- Programación interface inalámbrica
- 5- Diseño y armado de estructura
- 6- Montaje de partes
- 7- Pruebas en laboratorio
- 8- Ajuste y puesta a punto
- 9- Informe



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES  
CARRERA INGENIERÍA ELECTRÓNICA

AVANCE DEL PROYECTO INTEGRADOR

**“MINI PROTOTIPO SILLA DE RUEDAS CON MOTORES BRUSHLESS DE  
FLUJO AXIAL. SUPERVISION Y CONTROL.”**

Alumno  
Juan Ignacio Gallini

Director  
Ing. Adrián Agüero

Córdoba, República Argentina  
Septiembre 2017

Las tareas planteadas para llevar adelante el Proyecto Integrador son:

- 10-Revisión bibliográfica.
- 11-Diseño circuito de potencia.
- 12-Programación  $\mu$ C.
- 13-Programación interface inalámbrica.
- 14-Diseño y armado de estructura.
- 15-Montaje de partes.
- 16-Pruebas en laboratorio.
- 17-Ajuste y puesta a punto.
- 18-Informe.

Se revisó la bibliografía correspondiente (Ver Bibliografía) para comprender el funcionamiento de los motores brushless y poder diseñar un sistema de control para comandarlos.

Se utilizó el software Proteus 8.0 para el diseño de las placas de control, donde el componente central es el microcontrolador PIC16F877A y para las placas de potencia que son dos una para cada uno de los motores.

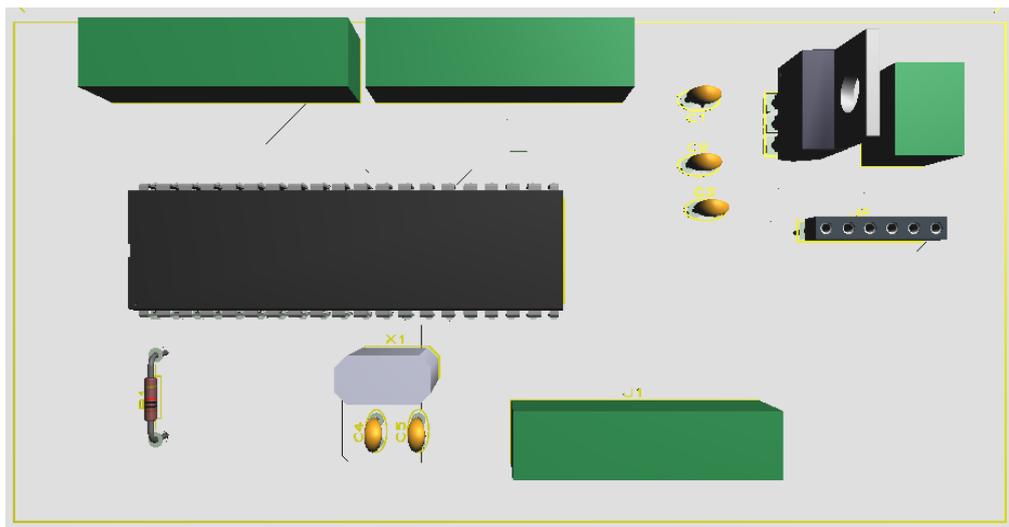


Figura 1: Placa de control. Vista 3D.

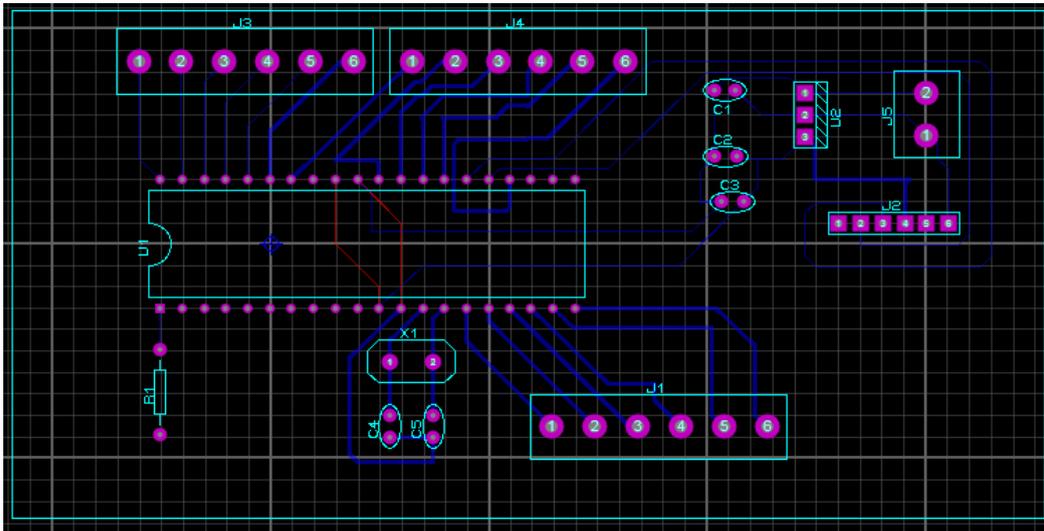


Figura 2: Placa de control. Circuitos.

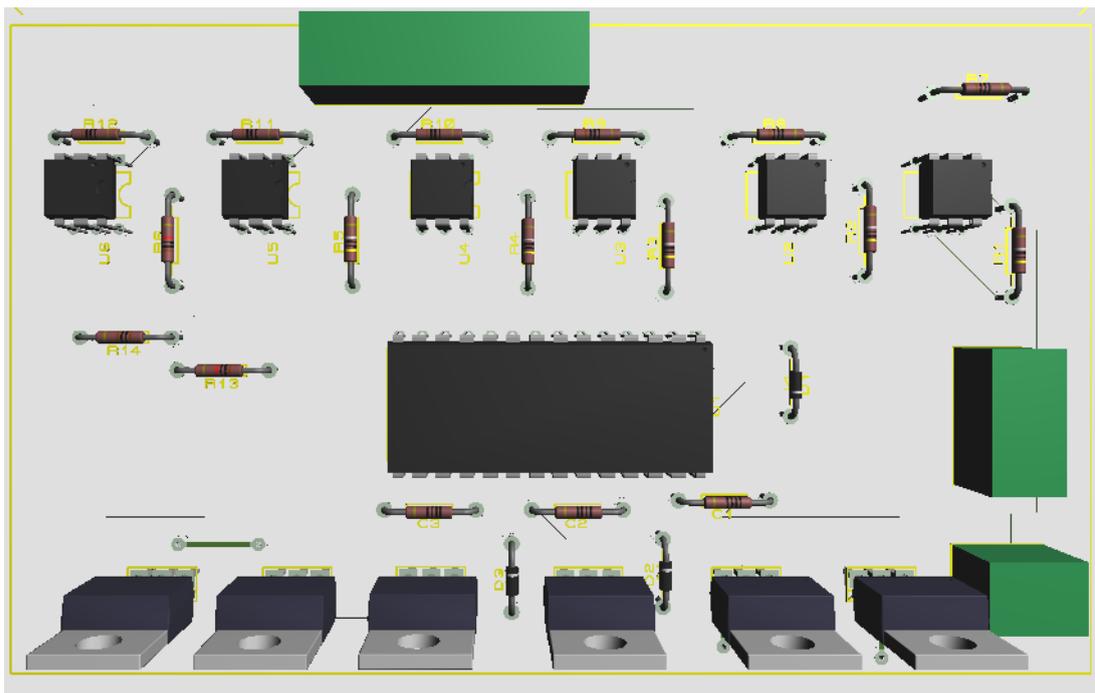


Figura 3: Placa de potencia. Vista 3D.

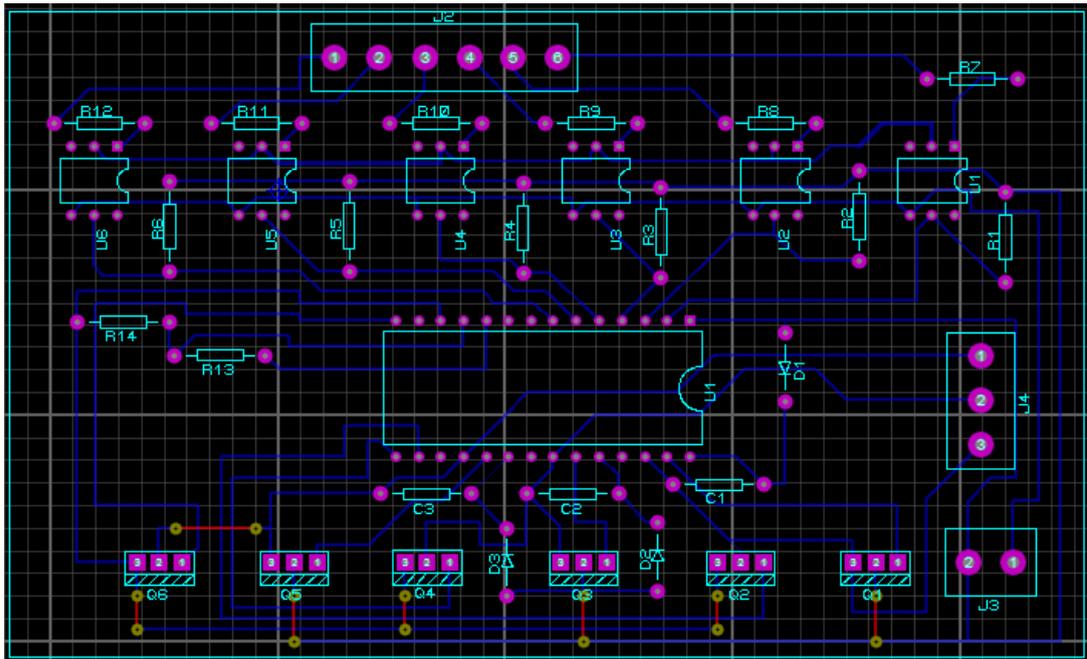


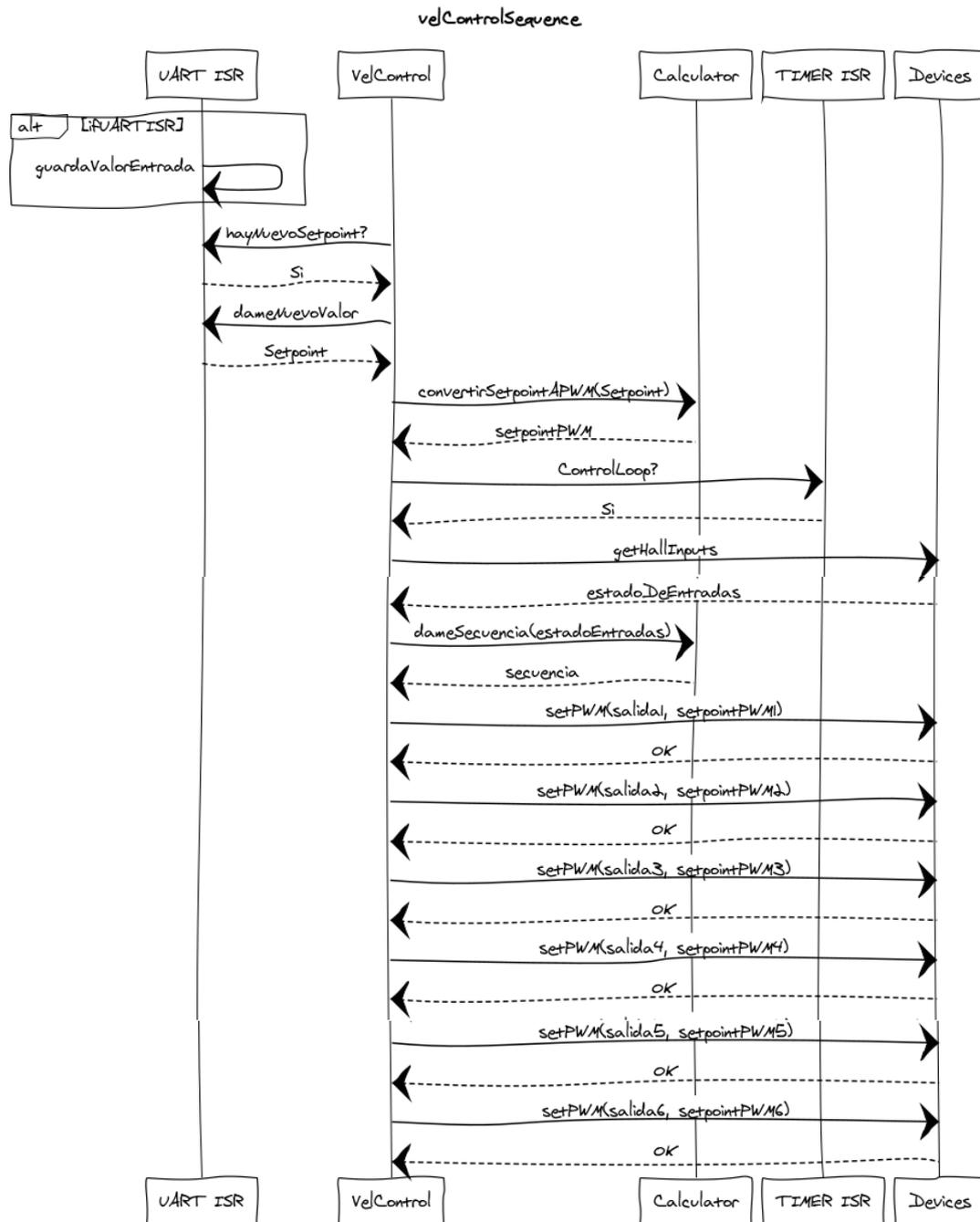
Figura 4: Placa de potencia. Circuitos.

Se realizó una estructura metálica a escala para la silla de ruedas junto a una base para colocarla y poder hacer las mediciones correspondientes.



Figura 5: Estructura silla de ruedas sin pintar.

Además se está llevando adelante la programación del microcontrolador PIC16F877A para controlar los motores y establecer la comunicación mediante bluetooth con el celular. A continuación se presenta un esquema de secuencia con las funciones que contiene el programa para llevar adelante las tareas antes mencionadas.



## BIBLIOGRAFIA

- Dr Duane Hanselman, "Brushless Permanent Magnet Motor Design", Segunda edición. 2003.
- Katsuhiko Ogata. "*Modern Control Engineering*". 5th Edition. Prentice Hall, 2010
- Stephen J. Chapman, "Maquinas Eléctricas" (Tercera Edición – Editorial Mc Graw Hill).
- Application Note AN885 Microchip, "Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals" by Padmaraja Yedamale, Microchip Technology Inc. 2003.
- Application Note AN857 Microchip, "Brushless DC Motor Control Made Easy" By Ward Brown, Microchip Technology Inc. 2002.
- Application Note AN047, "Brushless DC Motor Fundamentals".
  
- Reinaldo González Reyes, "Accionamiento de Motor DC Brushless por Modulación de Ancho de Pulso".
- Moreno M., Gustavo A. Pérez V., Milagros V. "Diseño concurrente de sillas de ruedas para minusválidos".
- Fernando Romera Juarez, "Vehículo eléctrico biplaza asistencial".
  
- Alastre Carballo Enrique. Arias Cabello Hector. "Silla-Banco con altura ajustable y programmable".
  
- Datasheet PIC16F87X.
- Datasheet IR2130.
- Datasheet UGN3132.
- Datasheet IRF520.
- Datasheet ACS712.
- General Purpose Type Photocoupler LTV-4N25 Series.



# UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES  
CARRERA INGENIERÍA ELECTRÓNICA

## AVANCE DEL PROYECTO INTEGRADOR

**“MINI PROTOTIPO SILLA DE RUEDAS CON MOTORES BRUSHLESS DE  
FLUJO AXIAL. SUPERVISION Y CONTROL.”**

Alumno  
Juan Ignacio Gallini

Director  
Ing. Adrián Agüero

Córdoba, República Argentina  
Noviembre 2017

Las tareas planteadas para llevar adelante el Proyecto Integrador son:

- 1- Revisión bibliográfica.
- 2- Diseño circuito de potencia.
- 3- Programación  $\mu$ C.
- 4- Programación interface inalámbrica.
- 5- Diseño y armado de estructura.
- 6- Montaje de partes.
- 7- Pruebas en laboratorio.
- 8- Ajuste y puesta a punto.
- 9- Informe.

Luego de hacer varias pruebas en placas de ensayos, se llevó adelante la fabricación de las mismas mediante la técnica de transferencia por calor y el tratamiento con cloruro férrico. A continuación se exponen las diferentes placas:

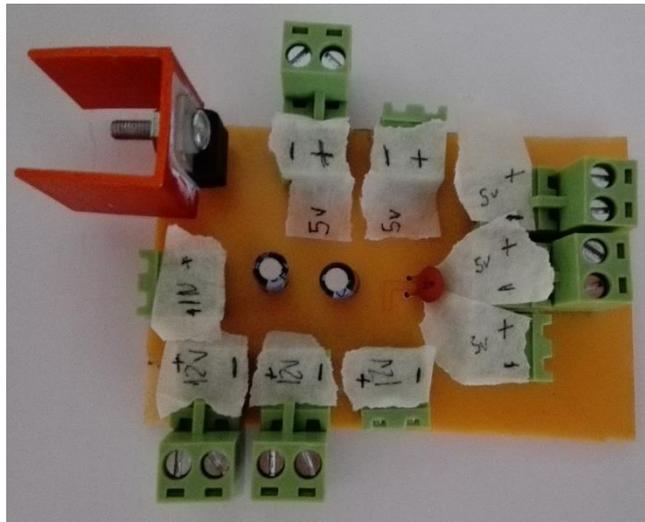


Figura 1: Placa de alimentación.

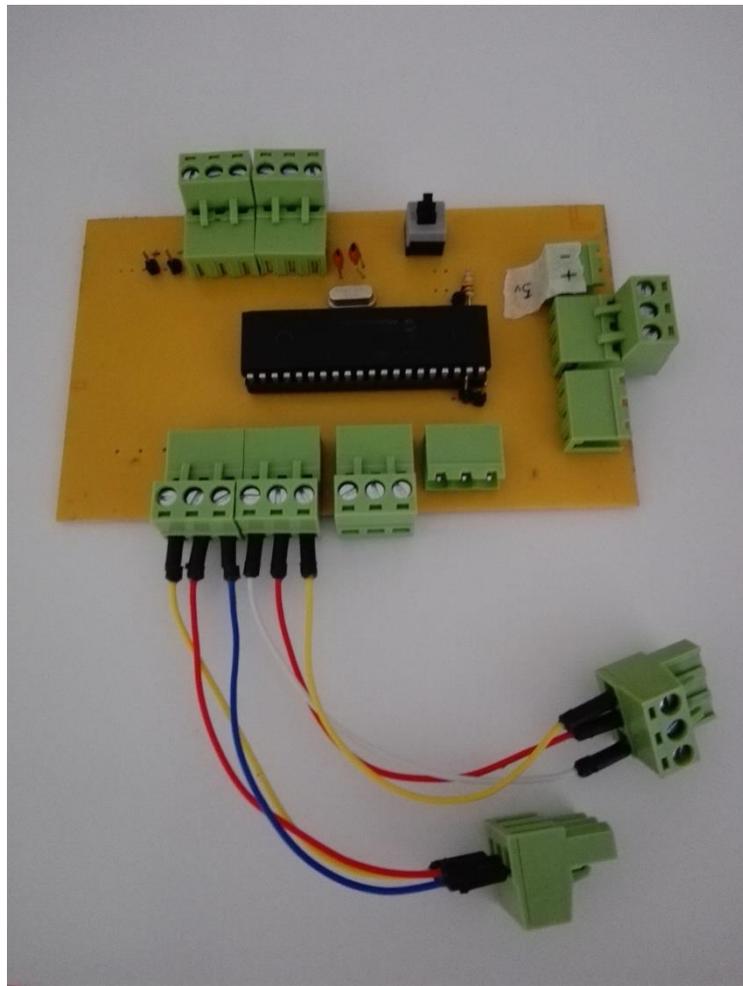


Figura 2: Placa de control.

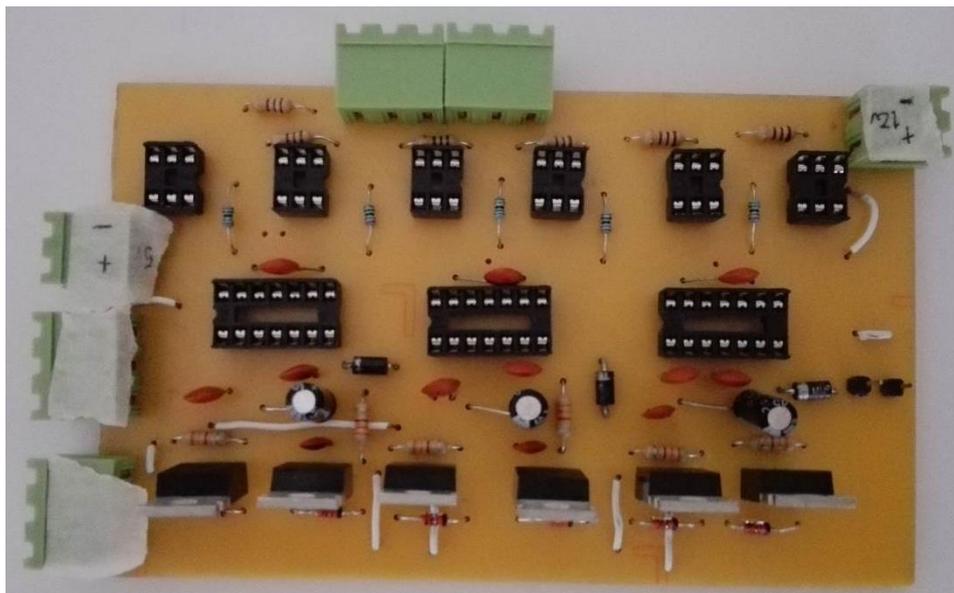


Figura 3: Placa de potencia.

Además se llevó adelante el armado del segundo motor, utilizando el rotor y el estator provisto por el Ing. Agüero.

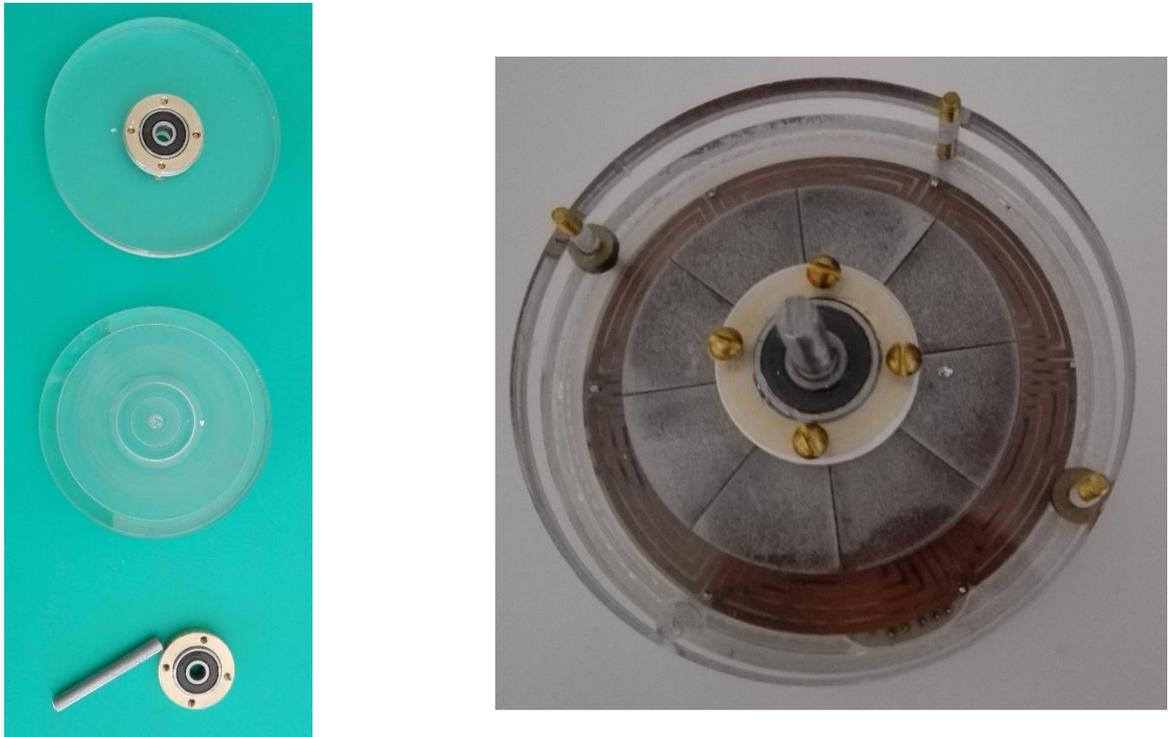


Figura 4: Motor brushless.

El módulo de control se encuentra funcionando correctamente, se está llevando adelante la puesta a punto con la placa de potencia y los correspondiente motores para luego continuar con la programación de la interfaz inalámbrica

## BIBLIOGRAFIA

- Dr Duane Hanselman, "Brushless Permanent Magnet Motor Design", Segunda edición. 2003.
- Katsuhiko Ogata. "*Modern Control Engineering*". 5th Edition. Prentice Hall, 2010
- Stephen J. Chapman, "Maquinas Eléctricas" (Tercera Edición – Editorial Mc Graw Hill).
- Application Note AN885 Microchip, "Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals" by Padmaraja Yedamale, Microchip Technology Inc. 2003.
- Application Note AN857 Microchip, "Brushless DC Motor Control Made Easy" By Ward Brown, Microchip Technology Inc. 2002.
- Application Note AN047, "Brushless DC Motor Fundamentals".
- Reinaldo González Reyes, "Accionamiento de Motor DC Brushless por Modulación de Ancho de Pulso".
- Moreno M., Gustavo A. Pérez V., Milagros V. "Diseño concurrente de sillas de ruedas para minusválidos".
- Fernando Romera Juarez, "Vehículo eléctrico biplaza asistencial".
- Alastre Carballo Enrique. Arias Cabello Hector. "Silla-Banco con altura ajustable y programmable".
- Datasheet PIC16F887.
- Datasheet IR2110.
- Datasheet UGN3132.
- Datasheet IRF630.
- Datasheet ACS712.
- General Purpose Type Photocoupler LTV-4N25 Series.

## **Nota de Aprobación Final del Director**