

# UACM

Universidad Autónoma  
de la Ciudad de México

*Nada humano me es ajeno*

COLEGIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

LICENCIATURA EN INGENIERIA EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS INDUSTRIALES

**Diseño y construcción de un vehículo eléctrico  
tipo triciclo invertido, impulsado por un motor brushless**

TRABAJO RECEPTACIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADO EN  
INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS INDUSTRIALES

PRESENTA

**HÉCTOR IVAN HERNÁNDEZ CRUZ**

Director de trabajo recepcional

**M. en I. Amaranto de Jesús Dávila Jáuregui**

Ciudad de México, febrero de 2017.

## SISTEMA BIBLIOTECARIO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN



## UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO COORDINACIÓN ACADÉMICA

### RESTRICCIONES DE USO PARA LAS TESIS DIGITALES

### DERECHOS RESERVADOS<sup>©</sup>

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

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

# Agradecimientos

A mis padres:

**Rufino Hernández Hernández.** Simple y sencillamente sin tu apoyo, esfuerzo, compromiso y trabajo, nada de esto sería posible. Te agradezco por todos los sacrificios que hiciste por mí y nuestra familia. Gracias por todas tus enseñanzas, porque a pesar de que no me podías enseñar académicamente, me supiste enseñar a afrontar la vida, tener fortaleza ante los problemas de la vida, siempre me guiaste por el camino correcto. Te agradezco por toda tu paciencia y que a pesar de que caí muchas veces, siempre me supiste levantar. Gracias por enseñarme el valor del trabajo y la responsabilidad. Gracias Papá.

**María del Carmen Cruz Alcántara.** Te agradezco por dedicar tu vida, tu cariño y hasta tu sueño a mi cuidado, muchas gracias por estar conmigo a lo largo de este camino. Gracias mamá por todas tus enseñanzas y decirme que hiciera siempre lo correcto, gracias porque al igual que mi papá me supieron levantar en momentos difíciles y formarme como una persona de bien. Te agradezco por toda tu paciencia y por toda la confianza que me brindaste. Gracias por los cuidados que me diste como una madre, por todas tus atenciones que me has brindado. Gracias Mamá.

A mis hermanos.

**Adriana Hernández Cruz.** Gracias hermana por estar siempre conmigo, por creer en mí, por ser mi amiga, gracias por todos tus consejos. Porque a lo largo de nuestras carreras nos hemos apoyado incondicionalmente. Gracias por darme la dicha de ser tío y de tener un motivo por el cual luchar y hacer que nada le falte, para educarlo como nos educaron nuestros padres, gracias por traer a nuestras vidas al pequeño **Ian Gabriel Brigido Hernández** y agradecer a mi cuñado **Manuel Brigido Contreras** por el apoyo incondicional que nos da y te da como esposo. Gracias compadres.

**Mitzi Alejandra Hernández Cruz.** Gracias hermana por ser mi amiga y mi compañera de todos momentos. Te agradezco por todos los consejos que me has dado y porque siempre has creído en mí. Gracias por todo tu apoyo en todo momento junto con **Erick García** y por acompañarme a lo largo de esta carrera. Gracias hermana.

**Andrea Arely Hernández Cruz.** Gracias mi changis por ser una persona alegre y eso es lo que contagias, alegría. Espero que todo este esfuerzo te quede como ejemplo para que siempre luches por lo que quieres y nunca te des por vencida. Gracias por ser una niña muy especial y juguetona con al cual siempre voy a contar. Gracias hermana.

**Mario Alberto Hernández Cruz.** Mi querido súper héroe, no hay edad para ser uno. Gracias beto por ser mi hermano con el cual jugar y compartir grandes momentos. Tú que estas empezando a formarte, toma todo esto como ejemplo y al igual que tus hermanas mayores, siempre se estén apoyando la güera y tú. Gracias hermano.

Le agradezco mis tíos Manuel, Ana, Ángel, Horten y a sus familias, por su incondicional apoyo y sus grandes consejos que me dieron durante este proceso. Les agradezco por los buenos momentos que pasamos como amigos y aun mejor como familia. A toda mi familia **Cruz Alcántara** en especial a mi tío Enrique, Betty, Víctor y Martha, no pueden faltar mis primos Alicia, Aldo, Alejandro y Mariana. Gracias por todo su apoyo.

Le agradezco a mis compañeros y amigos inseparables David (pato), Oscar (faria), Aarón (jamon), Sergio (duermes), Patrick, Gerardo (panda) y Miguel (saya). Les agradezco por estar ahí cuando se necesita un amigo, un hermano, porque con ustedes he vivido grandes momentos y experiencias. *LOS ALCOHOLES GALÁCTICOS.*

A mis amigos y compañeros del Club Alemán de México, por todo su apoyo que me han brindado tanto en lo laboral y en lo personal, por su amistad y por todo lo que hemos vivido dentro y fuera del trabajo, les agradezco a Hector, Fade, Omar, Pancho, Punchetas, Javier, Mauricio, Mara, Víctor, Paola, Juliana, charly y chino. *LOS HOMIES DEL ALEMAN.*

No pueden faltar mis amigos y mis incondicionales compas Argenis Sánchez, Sergio Mendoza y Francisco González, les agradezco por todo su apoyo y los grandes consejos que me dieron y porque no mencionar en los momentos que siempre pasamos en el relajo.

Les agradezco a mis amigos y compañeros de la universidad Gabriela Gomez, Marisol Gomez, María López Rodríguez, Oscar Molotla, Saúl Ríos, Ricardo Solís, Ricardo Pimentel. Gracias amigos porque sin su apoyo no se hubiera podido tener este gran logro.

Gracias a mis profesores por los consejos y porque compartieron con nosotros sus conocimientos y le agradezco a mi director M.I. Amaranto Dávila por darme la oportunidad de llevar este proyecto. Así como a mis lectores M.I. Miguel Ángel Zárate, M.I. Fermi Vázquez, Ing. Manuel Soriano, M.I. Christian Vázquez.

Agradezco a mi casa de estudios la Universidad Autónoma de la Ciudad de México (UACM), por darme la oportunidad de estudiar la carrera de Ingeniería en Sistemas Electrónicos Industriales y por formarme como una persona profesional y agradezco a la UACM por el apoyo recibido para la impresión y empastado de este trabajo.

# Índice general

Agradecimientos	I
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>2</b>
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA . . . . .	3
1.2. OBJETIVO GENERAL . . . . .	6
1.3. JUSTIFICACIÓN . . . . .	6
1.4. METODOLOGÍA . . . . .	7
1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES . . . . .	8
<b>2. VEHÍCULO ELÉCTRICO</b>	<b>9</b>
2.1. HISTORIA . . . . .	9
2.2. TIPOS DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS . . . . .	11
2.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICO . . . . .	12
2.4. ESTRUCTURA DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO . . . . .	12
2.5. TENDENCIAS . . . . .	14
2.6. VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN LA ACTUALIDAD . . . . .	16

<b>3. SISTEMA ELECTROMECAÁNICO DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO</b>	<b>21</b>
3.1. BATERÍA . . . . .	21
3.1.1. TIPOS DE BATERÍAS . . . . .	22
3.2. MOTOR ELÉCTRICO . . . . .	25
3.3. FUNCIONAMIENTO . . . . .	26
3.4. DISEÑO DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO . . . . .	27
3.4.1. DIMENSIONES DE LA ESTRUCTURA METÁLICA DE TRICICLO ELÉCTRICO . . . . .	29
3.4.2. DIAGRAMA DE BLOQUES DE LAS CONEXIONES ELÉCTRICAS DEL SISTEMA . . . . .	31
<b>4. MOTOR BRUSHLESS</b>	<b>33</b>
4.1. ANTECEDENTES . . . . .	33
4.2. MOTOR DC SIN ESCOBILLAS . . . . .	33
4.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS . . . . .	34
4.4. TIPOS DE MOTORES BRUSHLESS . . . . .	35
4.5. FUNCIONAMIENTO . . . . .	35
4.6. ESTATOR . . . . .	36
4.7. ROTOR . . . . .	37
4.8. SENSORES DE EFECTO HALL . . . . .	38
4.9. CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR BRUSHLESS (BLDC) UTILIZADO . . . . .	40
4.9.1. ESPECIFICACIONES DE FUNCIONAMIENTO . . . . .	41
4.9.2. PARTES DEL MOTOR BLDC UTILIZADO . . . . .	42
4.10. CONTROL DE MOTOR BRUSHLESS . . . . .	44
4.10.1. CONTROL BASADO EN LA CONMUTACIÓN TRAPEZOIDAL . . . . .	45

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	VI
<b>5. IMPLEMENTACION DEL VEHÍCULO</b>	<b>47</b>
5.1. CONTROLADOR . . . . .	47
5.1.1. MICROCONTROLADOR DSPIC30F4011 . . . . .	48
5.1.2. ADAPTACIÓN DE LOS SENSORES DE EFECTO HALL . . . . .	50
5.1.3. DIAGRAMA DE BLOQUES . . . . .	52
5.1.4. PROGRAMACION DEL CONTROLADOR . . . . .	55
5.2. MODULACION PWM PARA MOTOR BRUSHLESS . . . . .	56
5.3. CONVERTIDOR ESTÁTICO . . . . .	57
5.3.1. CLASIFICACION DEL CONVERTIDOR ESTÁTICO . . . . .	58
5.4. PUENTE TRIFASICO . . . . .	58
5.5. DISEÑO DEL PUENTE TRIFASICO Y DRIVERS . . . . .	59
5.5.1. SELECCIÓN DE LOS MOSFETs . . . . .	59
5.5.2. DRIVER IR2110 . . . . .	60
5.6. FUENTE DE ALIMENTACIÓN . . . . .	64
5.6.1. CONVERTIDOR CA/CD . . . . .	64
5.6.2. BATERÍAS . . . . .	67
5.6.3. FUENTES DE ALIMENTACIÓN DE 5v y 12v . . . . .	67
5.7. MONTAJE DE LOS CIRCUITOS . . . . .	69
5.7.1. CARGADOR DE BATERÍAS . . . . .	69
5.7.2. CONTROL PARA MOTOR BRUSHLESS . . . . .	70

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	1
<b>6. RESULTADOS EXPERIMENTALES</b>	<b>73</b>
6.1. SEÑALES DEL MICROCONTROLADOR . . . . .	73
6.2. SEÑALES DE LOS SENSORES HALL . . . . .	75
6.3. SEÑALES CON CARGA RESISTIVA . . . . .	76
6.4. PRUEBAS DE DESEMPEÑO AL VEHÍCULO ELÉCTRICO . . . . .	80
6.4.1. GRÁFICAS DE VELOCIDAD DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO . . . . .	80
6.4.2. TIEMPO DE DESCARGA DE LAS BATERÍAS . . . . .	81
6.4.3. TRABAJO REALIZADO POR EL VEHÍCULO ELÉCTRI- CO . . . . .	83
6.4.4. POTENCIA DE CONDUCCIÓN DEL VEHÍCULO . . . . .	85
6.5. COSTOS DEL PROYECTO . . . . .	89
<b>7. CONCLUSIONES</b>	<b>91</b>
7.1. RESULTADOS DEL PROYECTO . . . . .	92
7.2. LIMITACIONES . . . . .	93
7.3. TRABAJO A FUTURO . . . . .	94
<b>Bibliografía</b>	<b>95</b>

# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN

El presente proyecto propone el diseño y la construcción de un vehículo eléctrico de bajo costo que coadyuve a mejorar la movilidad en la ciudad de México. Debido a la gran concentración de la población y de contaminación en la ciudad, surge la necesidad de contar con medios de transportes seguros, eficientes, amigables con el medio ambiente y de bajo costo, además que cuenten con la capacidad de desplazarse entre las saturadas calles.

Un ejemplo de este tipo de vehículos es la bicicleta, actualmente nadie se sorprende si una persona usa bicicleta para ir a trabajar. La bicicleta es un excelente medio de transporte, es rápido, eficiente, saludable y agradable de utilizar, una desventaja que presenta su uso es que cuando las condiciones climatológicas no son buenas, resulta incómodo y hasta riesgoso. En nuestro país, a pesar de no ser un país especialmente cuidadoso con el entorno urbano existe una auténtica revolución en el uso de vehículos no contaminantes.

Según el terreno, la distancia o la condición física del usuario, el uso de la bicicleta puede representar un gran esfuerzo físico, lo cual puede desanimar su utilización. Además, no todas las personas cuentan con la habilidad para conducir una bicicleta de forma segura entre las congestionadas calles de la ciudad. Debido a esto, un vehículo eléctrico estable con estructura similar al de una bicicleta y que tenga la capacidad de ser conducido de manera similar a ésta (dirección y pedaleo) pero que además cuente con un motor eléctrico para disminuir el esfuerzo realizado por las personas y se mantenga en posición vertical aún sin estar en movimiento puede ser una solución ideal, ya que elimina factores como el esfuerzo físico y aumentar la seguridad, permitiendo recorrer más distancias en menos tiempo y con una fatiga física moderada.

Actualmente en la ciudad de México existen transportes eléctricos similares al propuesto en este proyecto, un ejemplo son los bici-taxis que operan en el Centro Histórico de la Ciudad, sin embargo, estos vehículos son demasiado grandes para poder evadir los congestionamientos vehiculares de forma eficiente y no están diseñados para circular por terrenos irregulares, además su uso para cualquier persona resulta relativamente incómoda al pedalear en una posición completamente sentada.

El vehículo propuesto en este proyecto será similar a un triciclo invertido hecho con estructura de metal, contara con un asiento individual, así como dos llantas frontales que controlaran la dirección del vehículo y una llanta trasera que portará en el eje al motor eléctrico brushless (in Wheel motor). El vehículo tendrá una fuente de energía compuesta por un banco de baterías, el banco de baterías tendrá su cargador de baterías, adicionalmente contará con accesorios como un acelerador de puño y un freno electromecánico, así como su propio controlador eléctrico.

## 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Hoy en día en la Ciudad de México se tiene una alta sobre población de vehículos contaminantes que circulan por la ciudad, saturando las calles y avenidas, generando una gran cantidad de contaminación y ocasionando un estrés excesivo a los usuarios.

La figura 1.1 muestra las emisiones de dióxido de nitrógeno, un gas que en altas concentraciones puede irritar las vías aéreas y potencializar los síntomas de personas que sufren enfermedades pulmonares, tanto Guadalajara (57.2) como el Distrito Federal (54.2) sobrepasan ampliamente los 40 microgramos por metro cúbico recomendados por la OMS y la UE. Monterrey, por su parte, registra niveles por debajo de dicha recomendación (29.0). [Hernandez, 2013]

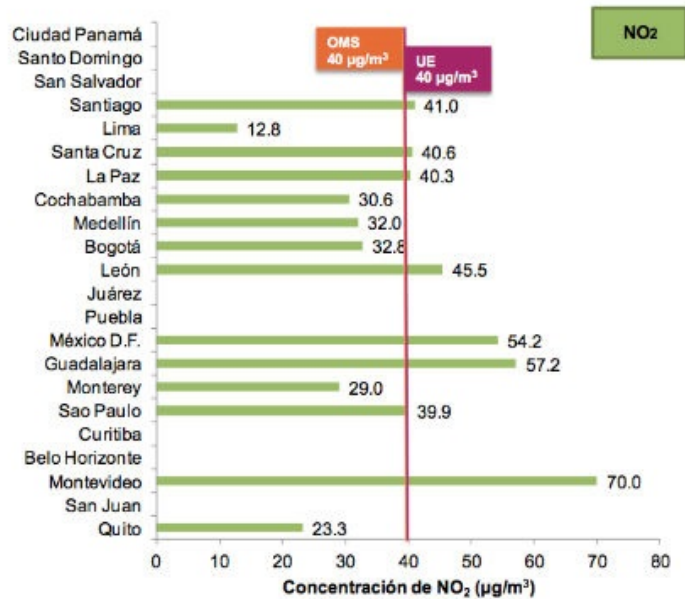


Figura 1.1: Concentración de Dióxido de Nitrógeno [Hernandez, 2013]

Los sistemas de transporte público resultan insuficientes en horas pico, es común ver por las mañanas las grandes cantidades de personas que “pelean” por lograr subir al sistema de transporte colectivo metro, tren ligero o al metrobus. Muchas de estas personas no cuentan con la capacidad de comprar un vehículo, lo que además aumentaría el problema mencionado.

Todos estos factores hacen que los tiempos de traslado en la ciudad sean excesivos lo cual además afecta también la productividad de las personas en general.

“Como se observa en la tabla 1.1 hay un claro predominio de los autos particulares en el Distrito Federal y el Estado de México, a pesar de que sólo representan alrededor del 16 % de los viajes de las personas al día. El incremento en el número de vehículos particulares está asociado a diferentes factores, entre los que destacan el crecimiento económico, las mejoras sectoriales de ingresos, distancias cada vez más largas, deficiencias en el transporte público, facilidades de crédito y la ambición de status”. [FIMEVIC, 2010]

Tipo de Vehiculo	Numero de vehiculo			
	Distrito Federal	Esatdo de mexico	ZMVM	
			Numero	%
Autos particulares	1,545,595	795.136	2.341.731	71.81
Taxis	103.298	6.109	109.407	3.36
Combis	3.944	1.555	5.499	0.17
Microbuses	22.931	9.098	32.029	0.98
Pick ups	73.248	262.832	336.880	10.31
Camiones de carga a gasolina			154.647	4.74
Vehículos de diesel superio a 3 toneladas			4.733	0.15
Tracto camiones de diesel			70.676	2.17
Autobuses de diesel	9.236	3.269	12.505	0.38
Vehículos de diesel = 3 toneladasl	28.580	28.580	90.940	2.79
Camiones de gas de carga LP	29.968	3.269	29.968	0.92
Motocicletas	72.280	424	72.704	2.23
<b>Total</b>	<b>2.118.096</b>	<b>1.142.823</b>	<b>3.260.919</b>	<b>100</b>

Cuadro 1.1: Vehículos que circulan en el DF. [FIMEVIC, 2010]

Por este motivo, el desarrollo de un vehículo eléctrico puede ayudar a mejorar la movilidad, reducir el ruido y la contaminación en nuestra ciudad, al mismo tiempo, cambiara el modo de vida que afecta a los habitantes de la Ciudad.

Al diseñar un vehículo eléctrico, los motores de corriente directa (DC) son una primera opción porque son económicos y fáciles de controlar. Los componentes están disponibles fácilmente en el mercado. Debido a que los motores de DC utilizan la energía de las baterías. La circuitería de control es mucho más simple, los motores de DC generan más torque (a partir de energía), por lo que no es raro que un coche eléctrico de DC no tenga transmisión, otro aspecto de la reducción de costos. Por eso se busca implementar un motor de corriente directa Brusless (BLDC) en el vehículo, los motores de DC sin escobillas generan menos calor que un motor de inducción de corriente alterna (AC), es decir, se desperdicia menos energía, así como el mantenimiento de los motores sin escobillas es mucho menos a los motores de DC.

## 1.2. OBJETIVO GENERAL

El objetivo de este proyecto es diseñar e implementar un vehículo eléctrico amigable con el ambiente, eficiente en cuanto al consumo de energía y de muy bajo costo que coadyuve a mejorar la movilidad de las personas en la Ciudad de México.

## 1.3. JUSTIFICACIÓN

Hoy en día en la ciudad de México trasladarse de un lugar a otro resulta muy problemático sobre todo en horas pico, aun contando con un vehículo propio, por la alta sobrepoblación y por la alta cantidad de vehículos que existen en la ciudad.

Para poder evitar estos inconvenientes la utilización de un vehículo eléctrico sobre todo si es similar a una bicicleta es una alternativa altamente saludable, ya que no contamina como lo hace un carro, se realiza ejercicio mientras uno se desplaza a su destino, puede manejarse por lugares que un automóvil no lo hace, con esto hace que uno llegue a su destino más rápido.

“En la ciudad de México 8 de cada 10 personas mayores de 30 años no realizan ninguna actividad física y la clase de educación física en escuelas primarias se

realizan una vez a la semana. Dura 30 minutos aproximadamente en promedio y solo 9 minutos de actividad moderada o intensa”. [Cruz, 2013]

La falta de ejercicio es uno de los principales factores del sobrepeso y la obesidad en nuestra ciudad.

“El problema del sobrepeso y la obesidad se han convertido en el principal problema de salud pública en México, pues es el principal factor de riesgo para desarrollar enfermedades crónica no transmisibles como diabetes y enfermedades cardiovasculares, que son las primeras causas de muerte en el Distrito Federal”. [CONTRAPESO, 2014]

Los costos de sus efectos en vidas humanas, económicas y sociales son muy altos y tienden a incrementarse. Con el uso de vehículos eléctricos que permitan al usuario realizar un esfuerzo moderado para impulsarlos se podrían reducir esta estadística.

Los problemas que se presentan en el vehículo eléctrico es la hora de utilizar el motor brushless, ya que el diseño del sistema de control se podría volver complejo. Se mencionará y describirá más adelante, el tipo de control que se utilizó para este tipo de motor.

Actualmente se está intensificando el uso de motores de DC sin escobillas para aplicaciones como bombas para el trasvase de fluidos, ventilación, vehículos eléctricos, generadores eólicos, drones, así como robots quirúrgicos y tecnología de radio terapia.

## 1.4. METODOLOGÍA

Se realizará un análisis detallado de las posibles estructuras metálicas para el vehículo, tomando en cuenta la seguridad y comodidad del conductor así como la eficiencia en el desplazamiento del vehículo.

Como sabemos el vehículo será un triciclo, por lo que en lo posible se utilizarán componentes de una bicicleta, lo cual reducirá los costos de producción así mismo disminuirá el tiempo de desarrollo. Los componentes que no se encuentren disponibles en el mercado de las bicicletas, se construirán, utilizando metales y herramientas convencionales.

Todo vehículo eléctrico, necesita una fuente de energía en este caso se utilizarán baterías recargables. El problema de esta fuente de energía es que una vez agotada

necesita ser recargada y para ello debe dejarse la batería recargando. Por esto será necesario diseñar un circuito que sea capaz de transformar la energía de corriente alterna a corriente directa para recargar el banco de baterías.

Se realizará un estudio de selección de componentes que nos ayudaran a un mejor manejo del vehículo, se tratara de implementar un sistema para el motor que porta la llanta. Se diseñarán tarjetas electrónicas, para el control de dicho motor, se probarán de forma aislada y en conjunto con todo el sistema.

Una vez que se tengan todos los subsistemas que componen al vehículo, se integrarán al diseño total para la realización de pruebas de eficiencia y desempeño del motor brushless sobre el sistema.

## 1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES

En este proyecto se diseñará y se implementará un vehículo eléctrico estable con estructura de un triciclo y que tenga la capacidad de ser conducido de manera similar a ésta, además va a contar con un motor eléctrico para desplazar al usuario de un punto a otro.

El vehículo será un prototipo básico pero funcional que permita mostrar todos los beneficios que tendría su producción y utilización. Así como la experimentación con motores brushless.

Se experimentará con el motor brushless para medir el trabajo que realiza este con diferentes personas y la potencia que ejerce este motor con las personas de diferentes pesos.

## Capítulo 2

# VEHÍCULO ELÉCTRICO

### 2.1. HISTORIA

El coche eléctrico fue uno de los primeros automóviles que se desarrollaron en la historia, de hecho existieron pequeños vehículos eléctricos, anteriores a los motores de combustión que trabajan con diesel o gasolina.

“Entre 1832 y 1839, el hombre de negocios escocés Robert Anderson, inventó el primer vehículo eléctrico puro. El profesor Sibrandus Stratingh de Groninga, diseñó y construyó con la ayuda de su asistente Christopher Becker los vehículos eléctricos a escala reducida en 1835. En 1865 los franceses Gaston Planté y en 1881 Camille Faure, hacen una mejora de la pila eléctrica, allanando el camino para este tipo de vehículo.” [EcuRed, 2010]

“Justo antes de 1900, antes de la preeminencia de los motores de combustión interna, los automóviles eléctricos realizaron registros de velocidad y distancia notables, entre los que destacan la ruptura de la barrera de los  $100km/h$ , de Camille Jenatzy en 1899, que alcanzó una velocidad máxima de  $105,88km/h$ . A su vez la introducción del arranque eléctrico del Cadillac en 1913 simplificó la tarea de arrancar el motor de combustión interna, que antes de esta mejora resultaba difícil y a veces peligroso”. [EcuRed, 2010]



Figura 2.1: Coche eléctrico en 1913. [Wikimedia, 2006]

Esta innovación, junto con el sistema de producción en cadenas de montaje de forma masiva y relativamente barata implantado por Ford desde 1908 contribuyó a la caída del vehículo eléctrico. Además las mejoras se sucedieron a mayor velocidad en los vehículos de combustión interna que en los vehículos eléctricos.

“A finales de 1930, la industria del automóvil eléctrico desapareció por completo, quedando relegada a algunas aplicaciones industriales muy concretas, como montacargas (introducidos en 1923 por Yale)”. [GRUDILEC, ]



Figura 2.2: Montacargas en 1931. [Guías, 2013]

A finales de la década de 1990 y principios del 2000 parecía que el automóvil eléctrico se convertiría en una realidad. Pero las limitaciones de la tecnología de baterías fueron excesivas. Los híbridos se volvieron una alternativa muy popular, por lo menos como unos recursos provisorios. Se cree que los avances en las baterías Litio-ion resolverán muchos de estos problemas y que los consumidores tendrán una idea diferente de los vehículos eléctricos. Algunas de las aplicaciones de este

tipo de vehículos eléctricos, son los carritos de golf, como los primeros modelos de Lektra en 1954.

## 2.2. TIPOS DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Un vehículo eléctrico es un vehículo de combustible alternativo impulsado por uno o más motores eléctricos, un claro ejemplo de este tipo de vehículos es una bicicleta eléctrica, estos están compuestos por un motor eléctrico que es acoplado a una de sus llantas, para ayudar en el avance del mismo, así como la energía es suministrada por una batería que se recarga en la red eléctrica.

Los vehículos eléctricos obtienen su capacidad de movimiento por energía eléctrica que es liberada por una batería. El sistema de generación y acumulación de la energía eléctrica constituye al sistema básico para mover un vehículo de este tipo. La función de este vehículo es transformar la energía eléctrica que llega a las baterías en movimiento, esta energía puede ser aprovechada tal cual llega, ya sea en forma de corriente continua o bien en corriente alterna.

Tipos de vehículos con propulsión eléctrica total o parcial:

- **El vehículo eléctrico puro:** Este utiliza la energía química guardada en una o varias baterías recargables y se puede enchufar a la red para recargar las baterías cuando esta accionado. Como ya lo habíamos mencionado utiliza motores eléctricos, este puedes estar equipado con frenos regenerativos que permiten recargar la batería en los momentos cuando la velocidad va bajando y en el tiempo de frenado.
- **Los vehículos híbridos:**
  - **Vehículos híbridos tradicionales:** Un vehículo híbrido clásico utiliza a la vez un motor de combustión interna tradicional y un motor eléctrico. El motor eléctrico utiliza la energía almacenada en unas baterías que se recargan mediante un generador accionado por el motor de combustión y mediante el uso de un sistema de frenado regenerativo.
  - **Vehículos híbridos de contacto:** Actúan como los híbridos tradicionales pero con más baterías, lo que permite una mayor autonomía del sistema eléctrico. Las baterías se pueden recargar tanto con el motor de combustión interna como desde un contacto eléctrico.

El móvil eléctrico es un nuevo concepto que mantiene la promesa de ser el medio de transporte más ecológico, menos ruidoso y además contribuye a que las ciudades seas más habitables.

## 2.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICO

Los vehículos eléctricos, como ya lo sabemos son vehículos capaces de desplazarse solo con el uso de baterías y de un motor capaz de convertir la electricidad en potencia para mover el vehículo.

La principal característica que distinguen a estos vehículos eléctricos con respecto a los vehículos de combustión interna, es que:

Los vehículos eléctricos no crean contaminación, ya que los vehículos que son alimentados con gasolina o dissel crean contaminación.

Los detalles más generales de los vehículos eléctricos es que llevan un motor eléctrico, el motor recibe la potencia por un controlador. Toda esta potencia es tomada por un banco de baterías. Algunos de los cambios que se han realizado a los vehículos eléctricos es que el motor ya no es de combustión interna o de gasolina, el convertidor catalítico y el tanque de gasolina son retirados. El acelerador va conectado a un potenciómetro (resistencias variables), los cuales permiten el paso de energía que indica al controlador la velocidad del vehículo.

## 2.4. ESTRUCTURA DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO

Existen diferentes estructuras de vehículos eléctricos que se diseñan según a las expectativas y necesidades del usuario, dependiendo de las exigencias sobre el vehículo, pueden verse reflejados en el tipo de estructura, ciertos aspectos del usuario como su estatura, el género del usuario y su peso entre otras cosas.

La estructura o chasis de los vehículos, aporta rigidez y condiciona la forma y la dinámica final del vehículo. Sostiene todos los elementos que lo conforman como los neumáticos, la batería, el motor eléctrico, controladores, sensores, etc. Una estructura con buenas condiciones hace que tengamos un vehículo firme, estable y fácil de maniobrar. Un aspecto importante a considerar es la estética final del vehículo que también está determinada por el chasis, ya que muchas veces los usuarios se enfocan más en la estética de los automóviles que en su eficiencia. Así que para que estos vehículos tengan buenos diseños se necesita contar con una buena estructura.

Existe una gran diversidad de estructuras comerciales cuyo diseño varía en función de la aplicación que se le da al vehículo. En estos ámbitos comerciales se encuentran con bicicletas eléctricas como se muestra en la figura 2.3 , carritos de golf o de supermercado, montacargas, automóviles eléctricos como el que se muestra en la figura 2.4 ; claro que estas tienen la misma finalidad, transportar a las personas de un lugar a otro, pero nos queda claro que sus acciones son diferentes, ya que unas pueden transportar a una sola persona como la bicicleta eléctrica o los carritos de supermercado, otros exigen transportar peso como los montacargas y otros pueden transportar a más de dos personas como los carritos de golf y los automóviles eléctricos, así como hay vehículos que requieren más esfuerzo que otros como la bicicleta, cuando esta se queda sin carga en la batería, para poder moverla necesitamos pedalear y por ejemplo los automóviles eléctricos, no se pueden mover cuando se quedan sin carga en la batería, sino hasta cuando se enchufa en una toma de corriente.

Aunque en diseños y estructuras son muy diferentes los vehículos eléctricos y las bicicletas eléctricas los componentes que contienen estos son los mismos, las diferencias pueden ser que un vehículo eléctrico es de 4 ruedas (ver figura 2.4) y la bicicleta eléctrica es de 2 ruedas (ver figura 2.3), así como la cantidad de motores que pueden llegar a tener estos, tanto los vehículos como las bicicletas pueden tener 1 o 2 motores.

Con respecto a las baterías, estos vehículos eléctricos pueden llegar a tener varias de baterías, pero lo recomendable es llegar a tener las baterías necesarias para alimentar al motor del vehículo. Si llegamos a tener un motor que se alimenta con 48v se pueden tener 4 baterías de 12v conectadas en serie. También otra de sus variaciones son el tipo de sensado que tienen, ya que un automóvil eléctrico contiene una gran cantidad de sensores con respecto a la bicicleta eléctrica.

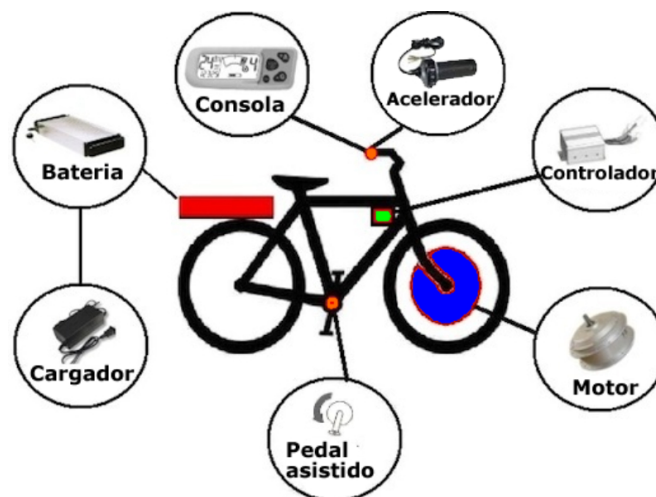


Figura 2.3: Partes de una bicicleta eléctrica

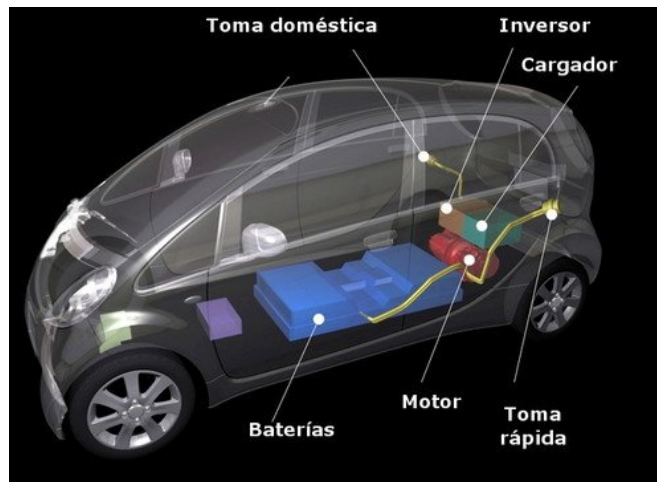


Figura 2.4: Partes de un automóvil eléctrico

## 2.5. TENDENCIAS

Ingenieros e investigadores han desarrollado un trabajo que explota las ventajas de los motores sin escobillas, los estudios realizados a estos motores, se han puesto en práctica con algunos prototipos de vehículos eléctricos, debido a la eficiencia que se tiene en el mantenimiento de los motores de DC. Sin embargo, para que su uso sea extensivo y de bajo costo es necesario implementar mejoras y alternativas en los diseños de controladores para estos motores.

Las tendencias que marca el uso de los motores brushless en diversas aplicaciones, es relativamente impresionante, ya que los usos de estos motores pueden servir para instrumentos médicos, aerogeneradores, vehículos eléctricos como se viene mencionando, productos aéreos como los drones, ventiladores, máquinas de uso más rudo como perforadoras.

Electric Vehicle Initiative, es un foro mundial de alto nivel para promover políticas y programas que permitan avanzar en la tecnología de energía limpia, este foro dedica a la aceleración de autos eléctricos en el mundo, se plantea que en los próximos años existan más unidades de este tipo eléctrico circulando a nivel mundial.



Figura 2.5: Tesla Model S el auto eléctrico 2013. [HYE, 2012]



Figura 2.6: Mitsubishi Outlander PHEV. [Cano, 2014]

“Las tendencias actuales en ventas del mercado indican que los autos eléctricos más atractivos son los híbridos (PHEV), en este sentido, los que destacan en este ámbito son: *Volt Chevrolet*, *Tesla Model S* como el que se muestra en la figura 2.5, *Mitsubishi Outlander PHEV* como el que se aprecia en la figura 2.6, *Smart ED*, *Renault ZOE*, *Nissan Leaf* y *BMW i3 REX* como los vehículos híbridos (PHEV) más vendido del sector”. [Gil, 2016]

En el mercado de los vehículos eléctricos surgen también las bicicletas eléctricas que están marcando una tendencia muy alta en el mercado, empresas como *ELECTROBIKE* y otras más, se han dedicado a la construcción y a la mejora de estas. También podemos encontrar vehículos eléctricos para discapacitados, prototipos que mejoran a la silla de ruedas y hacen que los usuarios de estas se vean beneficiados. Tenemos en algunos clubs deportivos carritos de golf, que sin duda fue de los primeros prototipos de lo que es un vehículo eléctrico, así como carritos eléctricos en los súper mercados, que es una forma muy allegada a lo que son un carrito de golf.

Lo que marca toda esta tendencia de vehículos eléctricos es la ventaja económica, es sin duda es el mayor aliciente a la hora de adquirir un vehículo eléctrico. Ahorro en mantenimiento, el vehículo eléctrico no utiliza aceite ni lubricantes, el número de filtros es menor, así como el desgaste de los frenos, tampoco tiene transmisiones mecánicas. Mayor eficiencia energética, se estima que el ahorro energético en los vehículos eléctricos es el doble que el de los vehículos de combustión. Este tipo de vehículos como ya lo hemos mencionado tienen cierto respeto por el medio ambiente, sin duda una de las principales causas de cara al futuro.

## 2.6. VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN LA ACTUALIDAD

Algunas marcas reconocidas a nivel mundial en el ámbito automotriz, se han dado a la tarea de innovar con vehículos eléctricos, dándoles velocidad, un nivel alto en el tiempo de carga, seguridad y estabilidad, comodidad y algunos que otros lujos como los tienen los vehículos de combustión interna, algunos modelos de estas marcas son las siguientes:

- *Smart ForTwo Electric Driver*

Este es un coche eléctrico pequeño como se muestra en la figura 2.7. Este coche monta un motor de imán permanente, es un coche de dos plazas y tres puertas. Acelera de 0 a  $100\text{km/h}$  en 11,5 segundos. Alcanza los  $125\text{km/h}$  de velocidad máxima. Admite recarga lenta y también recarga semi-rápida a  $22\text{kW}$  de potencia, se podría decir que carga en poco más de una hora.



Figura 2.7: Smart ForTwo Electric Driver. [Ibanes, 2014]

- *Volkswagen e-up*

El e-up contiene cinco puertas, es de cuatro plazas. Este automóvil acelera de 0 a  $100\text{km/h}$  en 12,4 segundos y puede alcanzar la velocidad máxima de  $130\text{km/h}$ . admite recarga lenta y también recarga rápida de  $40\text{kW}$  de potencia, lo que supone que recarga en menos de media hora, se puede apreciar en la figura 2.8.



Figura 2.8: Volkswagen e-up. [Ibanes, 2014]

- *Renault ZOE*

Este vehículo es bastante compacto, es de tamaño medio como se muestra en la figura 2.9, este vehículo monta un motor de corriente alterna de 88 CV, es de cinco puertas, cuenta con 5 plazas y un maletero bastante generoso. Puede acelerar de 0 a  $100\text{km/h}$  en 13,5 segundos, alcanza una velocidad máxima de  $135\text{km/h}$ . Admite una recarga lenta y recarga rápida de  $43\text{kW}$ , en media hora puede recargarse. También cuenta con climatizador, bomba de calor, que consume menos energía y un sistema de conectividad media con navegador GPS y pantalla táctil.



Figura 2.9: Renault ZOE .[Ibanes, 2014]

- *BMW i3*

En la figura 2.10 muestra al BMW i3, es un producto un poco diferente a los anteriores, ya que presenta cierta aura de deportividad y exclusividad que le otorga la marca que Premium que lo fabrica, este cuenta con su motor propio como el BMW eDriver, tiene cuatro plazas y es de cinco puertas. Es muy potente y rápido pues acelera de 0 a  $100\text{km/h}$  en 7,2 segundos, con una velocidad máxima de  $150\text{km/h}$ . una de las ventajas o desventajas de este automóvil lujoso es que la recarga rápida es opcional, así como algunos de sus accesorios.



Figura 2.10: BMW i3 [Ibanes, 2014]

- *Nissan LEAF*

En la figura 2.11 se puede apreciar al Nissan LEAF, este es un vehículo de cinco plazas y un maletero amplio, es un coche de conducción muy refinada y confortable, puede acelerar de 0 a  $100\text{km/h}$  en 11,5 segundos y puede

alcanzar los  $145\text{km/h}$ . El motor que monta el Nissan LEAF es un motor eléctrico síncrono. Puede admitir una recarga lenta y también recarga rápida a  $50\text{kW}$  de potencia, lo que puede suponerse que carga en menos de media hora.



Figura 2.11: Nissan LEAF [Ibanes, 2014]

- *Volkswagen e-Golf*

El Volkswagen e-Golf como se muestra en la figura 2.12 , es un vehículo que cuenta con 5 plazas, es de cinco puertas y un maletero amplio, acelera de 0 a  $100\text{km/h}$  en 10,4 segundos y alcanza los  $140\text{km/h}$  de velocidad máxima. Lo que distingue a este vehículo de algunos es que su motor eléctrico es de  $85\text{ kW}$  y refrigerado por agua. Admite una recarga lenta y una recarga rápida a  $40\text{kW}$  de potencia. Este vehículo solo tiene una nivel de acabado y viene muy bien equipado con faros Full LED y un equipo multimedia con navegador GPS.



Figura 2.12: Volkswagen e-Golf [Ibanes, 2014]

- *Renault TWIZY*

El Renault TWIZY como se muestra en la figura 2.13, este vehículo cuenta con una plaza, es de 3 puertas, alcanza una velocidad  $75\text{km/h}$ , su motor eléctrico es 3CG Asíncrono, este cuenta con una batería de litio recargable por corriente directa en un periodo de 3 a 4 horas con un voltaje de  $220\text{volts}$  o de 5 a 6 horas para  $110\text{volts}$  que es más común en la Ciudad de México.



Figura 2.13: Renault Twizy [RENAULT, 2016]

- *Mercedes-Benz SLS AMG Electric Drive*

En la figura 2.14 se muestra a el SLS AMG Electric Drive es el primer eléctrico de Mercedes, un supe deportivo desarrollado con tecnología procedente de la Formula 1. Monta cuatro motores eléctricos brushless, uno en cada rueda que le otorgan una potencia de  $750\text{CV}$  y un par de  $1000\text{Nm}$ . Su aceleración es de  $3,9\text{segundos}$  los  $100$  y tiene una velocidad máxima de  $250\text{km/h}$ .



Figura 2.14: Mercedes-Benz SLS AMG Electric Drive [Electromaps, 2016]

## Capítulo 3

# SISTEMA ELECTROMECAÁNICO DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO

### 3.1. BATERÍA

La batería es el elemento que le proporciona energía eléctrica a los dispositivos, tanto al motor como al controlador. Esta es cargada por un medio en específico, principalmente la batería se carga con la energía de la línea eléctrica debido a un convertidor AC/DC.

Las baterías no deben de ser descargadas rutinariamente por debajo del 50 % de su capacidad. Bajo condiciones extremas, como tormentas o pérdidas de suministro de la red eléctrica por varios días, es posible descargar el banco hasta llegar a un 20 % de su capacidad. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que descargas mayores pueden dañar permanentemente las baterías o reducir drásticamente su vida útil.

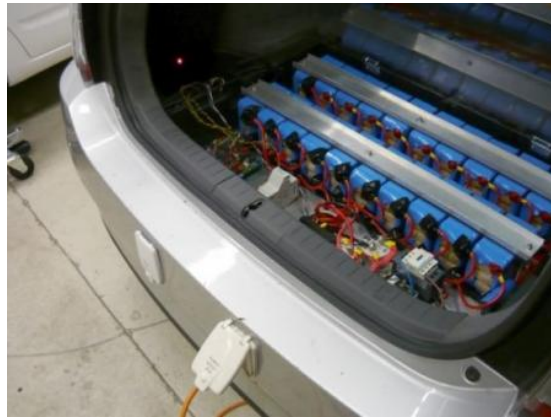


Figura 3.1: Baterías de un vehiculo electrico [Sanchez, 2011]

### 3.1.1. TIPOS DE BATERÍAS

Existe varios tipos de baterías, las más destacadas para este uso se les hace mención a continuación:

- Baterías de plomo:** Este tipo de batería son muy económicas, son utilizadas en los automóviles convencionales para el arranque de este, como sabemos este tipo de baterías son muy pesadas, es por eso que se descartan de las bicicletas eléctricas, aunque en los automóviles no ve afectado por el peso de esta.

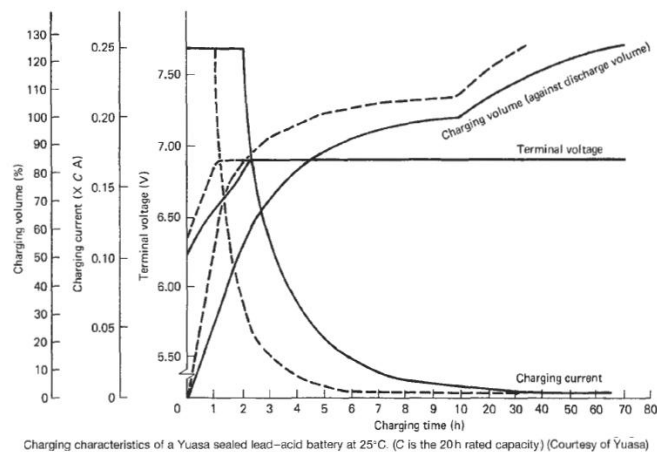


Figura 3.2: Curvas de carga de una batería Plomo-Acido [Mirez, 2010]

Se ha escuchado hablar de cargas rápidas y lentas de las baterías, podrán identificar las respectivas curvas de la figura 3.2. En general, se tiene que cuidar de las cargas rápidas, más que nada de los equipos que cargan por pulsos, ya que muchos de ellos dañan las baterías, disminuyendo la vida útil de ellos. Por lo que una corriente de carga constante es lo mejor.

- **Baterías de Litio:** Son las baterías más utilizadas actualmente para este tipo de sistemas ya que son más pequeñas y ligeras que las anteriores. Son mucho más ecológicas que las que contienen plomo o níquel. Como inconveniente tienen un precio elevado. Dentro del litio, hay algunas variedades:
  - **Baterías de Litio-ion:** Su rápida degradación y sensibilidad a las elevadas temperaturas, que pueden resultar en su destrucción por inflamación o incluso explosión, requieren en su configuración como producto de consumo, la inclusión de dispositivos adicionales de seguridad, resultando en un coste superior que ha limitado la extensión de su uso a otras aplicaciones.

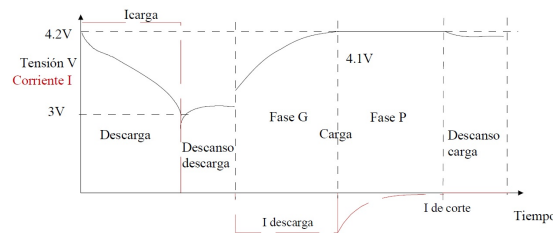


Figura 3.3: Carga y descarga de una batería Li-ion [Acosta, 2011]

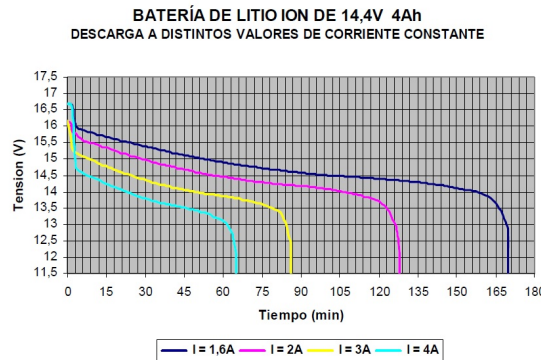


Figura 3.4: Curva de descarga con corriente constante. [Probattery, 2011]

Se puede decir que la baja temperatura retarda la reacción química, lo que se traduce como un brusco aumento de la resistencia interna de la batería lo que provoca una mayor caída de voltaje. En las curvas de descarga a menor carga la caída de tensión es lenta más sin en cambio

a mayor carga la caída es más rápida como se muestra en la figura 3.4. Para la carga, se observa que el voltaje correspondiente a un dado estado y corriente de carga, es siempre menor cuando la temperatura disminuye. Es conveniente cargar una batería con un nivel de corriente que no exceda el máximo dado por el fabricante. En la figura 3.3, se observa que para realizar una carga esta debe de llegar por lo menos 20 % para realizarla con una corriente constante.

- **Baterías de Litio Titanato (*LiTiO*):** La batería de litio-titanato es un tipo de batería recargable, que tiene la ventaja de ser más rápida para cargar que otras baterías de ion-litio. Las baterías de titanato se utilizan en el vehículo eléctrico Mitsubishi i-MiEV vehículo y Honda los usa en su bicicleta eléctrica EV-neo y Fit EV. La desventaja que tiene la batería convencional de litio-ion respecto a la de titanato, es que tiene una tensión más baja y una menor capacidad de carga.

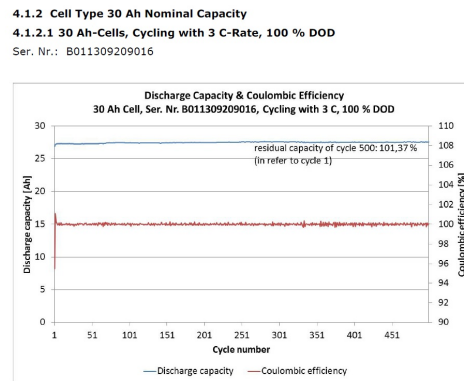


Figura 3.5: Carga y descarga de la batería LiTiO. [S.L., 2014]

El nuevo tipo de baterías de litio (LTO o litio titanato), proporcionan una mejora muy importante sobre las cualidades de las ya conocidas baterías de litio hierro fosfato ( $\text{LiFePo}_4$ ). Esta tecnología prometedora que emplea materiales nanos estructurados para mejorar el rendimiento, la calidad y la vida útil de estas baterías.

Para que nos hagamos una idea, estas baterías pueden recargarse 20 veces más rápido que una batería convencional de plomo ácido y 3 veces más rápido que las de  $\text{LiFePo}_4$ .

En la figura 3.5, se observa cómo se somete la batería a descargas al 100 % por lo que se ve claramente que después de casi 500 ciclos de descarga muestra un 102 % de capacidad respecto al inicio.

- **Batería de Litio Polímero (*LiPo*):** Es la segunda generación de baterías. Están formadas por unas finas láminas. Su principal ventaja

frente al litio-ion es que soportan golpes y deformaciones sin peligro de pérdida de líquido o explosión.

Además, aceptan tasas de descargas muy altas (siempre con un circuito de protección), lo que es útil en una bicicleta eléctrica para momentos de aceleración, subidas, etc. Son muy utilizadas en electrónica y en aviones de radiocontrol.

- **Baterías de Litio Ferroso ( $LiFe$ ):** Son la última generación conocida y hasta ahora, la más avanzada. Tiene una vida útil de unos 1500 ciclos y no tienen ningún peligro de fuga o explosión. Son capaces de suministrar hasta el doble de su capacidad nominal por breves espacios de tiempo. Ofrecen una densidad energética (corriente de salida) muy superior a las baterías de Litio-Ion y NCM.
- **Baterías de FerroFosfato ( $LiFePO_4$ ):** Las baterías LFP se utilizan en robótica debido a que tienen una buena relación entre la cantidad de energía almacenada y el tamaño de cada elemento. Esta tecnología se basa directamente en la química de los iones de litio, pero utiliza elementos químicos individuales.

Las características de las baterías que se van a utilizar se encuentran resumidas dentro del capítulo 5.

## 3.2. MOTOR ELÉCTRICO

El motor de un vehículo eléctrico transforma la energía eléctrica en energía mecánica y también puede hacerlo en sentido inverso de energía mecánica a energía eléctrica funcionando como generador. Esto se debe a los campos magnéticos generados en las bobinas que conforman a este motor. Los parámetros de operación de un motor designan sus características, es importante determinarlas, ya que con ellas conoceremos los parámetros determinantes para la operación del motor.

La principal característica que pueden llegar a tener los motores Brushless es:

**Potencia del Motor:** Es la rapidez con la que realiza su trabajo. La potencia viene dada por el controlador, si el controlador lo permite puede dar picos del doble de la potencia nominal durante la arrancada.

El tipo de transmisión es un factor decisivo en la construcción de los vehículos eléctricos, hay dos tipos:

- **Motor instalado en el eje:** En algunos vehículos como la bicicleta, este motor es instalado en el eje de pedaleo, este asiste desde el primer momento y el motor hace uso de los cambios ya que actúa en los pedales.
- **Motor instalado en los rines de las llantas (*IN WILL MOTOR*):** Esta forma es la más frecuente de encontrar al motor instalado, porque facilita el montaje y el mantenimiento de este. Este se puede encontrar instalado en las ruedas delanteras del vehículo.

Las características de motor brushless usado en este proyecto, se encuentra resumidas dentro del capítulo 4.

### 3.3. FUNCIONAMIENTO

Los motores eléctricos destacan por su alta eficiencia a diferentes regímenes de funcionamiento. Para analizar su eficiencia energética habría que centrarse en la forma de suministro de energía eléctrica al motor. “El gasto energético del motor de un vehículo eléctrico oscila entre los 10 y los 20kWh en un recorrido tipo de 100km. Tomando como ejemplo el consumo anunciado para el Tesla Roadster (es un coche deportivo totalmente eléctrico de 180kW de potencia máxima) de 11kWh, podemos aproximar la energía con la que hemos de cargar esas baterías para realizar dicho recorrido.

Suponiendo una eficiencia de carga del 85 % y una eficiencia del ciclo de descarga del 95 % (80 % en picos de potencia), se tiene que alimentar a las baterías con 13,6kWh para esa distancia de 100km, o lo que significa un coste de 1,9 euros para esos 100km ” [AKTUA, 2010]. Lo que significa que esta cantidad corresponde a 40,75MXN, si estuviéramos en la ciudad de México.

Aunque un vehículo eléctrico no produce emisiones contaminantes durante su funcionamiento, la generación de energía eléctrica habitualmente da lugar a emisiones contaminantes y al consumo de recursos no renovables, que pueden anularse si se utilizan energías renovables como fuente de energía primaria.

“Asimismo, durante la generación, el transporte y la transformación de energía eléctrica se pierde parte de la energía, por lo que la energía útil es inferior a la energía primaria. Lo mismo sucede con el petróleo, que además de los gastos de transporte debidos a la diferencia geográfica de los lugares de producción y de consumo, es necesario transformar en refinerías en los diferentes productos derivados del petróleo, incluyendo los carburantes ” [AKTUA, 2010].

### 3.4. DISEÑO DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO

El diseño que se elaborara para el proyecto es el que se muestra en la figura 3.6. El sistema de dirección partirá de la idea de una bicicleta eléctrica, este vehículo eléctrico cuenta con 3 ruedas una trasera que es la que transportará al motor y dos ruedas delanteras que controlara la dirección del vehículo.

En cuanto al sistema de frenado se basará en un freno electromecánico, este consta de dos partes, una mecánica y otra eléctrica, estas dos partes del freno van de la mano, ya que cuando el carro está andando y el usuario frena, lo que hace este freno es que desactiva al motor, mandando una señal al controlador por medio de un *SWCHIT*, una vez que se desactiva al motor, y la parte mecánica aplica una fuerza por medio de un chicote para hacer el frenado de la vehículo.

La parte del controlador se adaptará al vehículo en la parte de trasera, las baterías se colocarán de igual forma en la parte de atrás del vehículo. Se colocará un asiento para el usuario del vehículo.

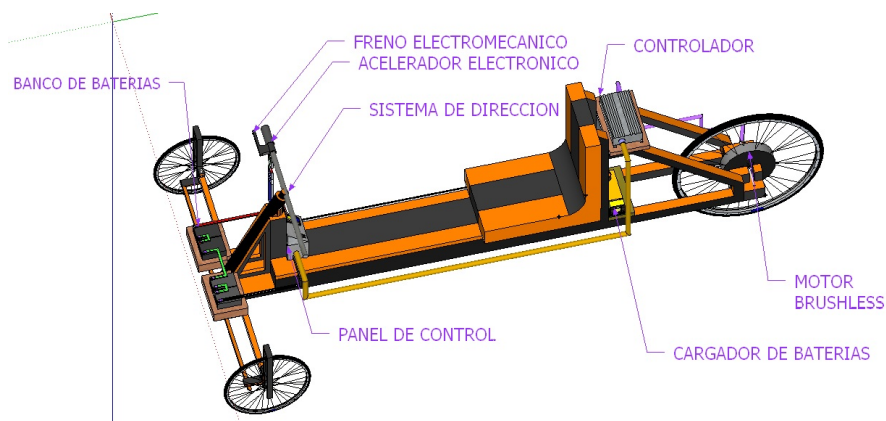


Figura 3.6: Diseño del triciclo eléctrico

El funcionamiento de este vehículo eléctrico es muy sencillo, para el encendido y apagado del triciclo se realizara mediante un botón. Tendremos un botón que le dirá al vehículo que avance o retroceda. En los sistemas de alimentación para el automóvil eléctrico debe tener una conexión directa con algún contacto de energía para que recargue el banco de baterías.

El usuario es quien decide como quiere llevar al vehículo, daremos cierta velocidad máxima por cuestiones de seguridad para el usuario. Si fuera el caso de una bicicleta eléctrica siempre se trata de que esta vaya con una velocidad moderada, porque el nivel de peligro de esta es mayor que los vehículos eléctricos.

Las figuras 3.7 y 3.8 son las vistas del triciclo eléctrico, en estas figuras se alcanza a apreciar las partes ya mencionadas. También las conexiones que debe tener este vehículo tanto las conexiones del panel de control al controlador y la fuente de alimentación al controlador y al motor brushless.

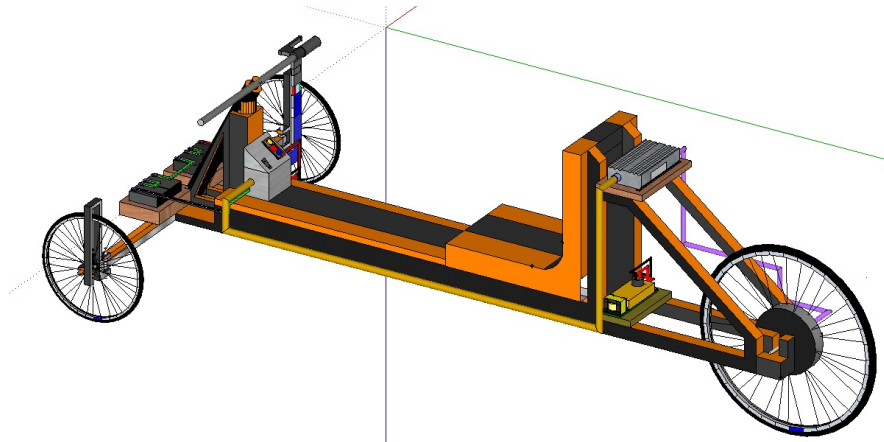


Figura 3.7: Partes del triciclo eléctrico

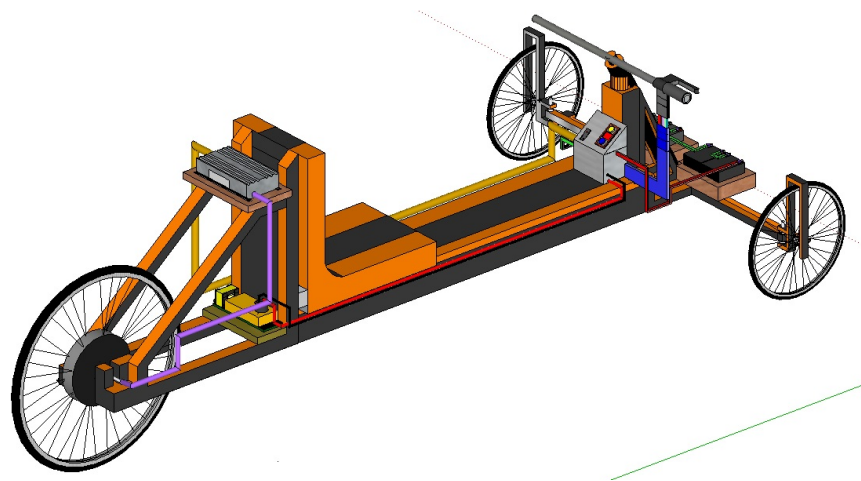


Figura 3.8: Partes del triciclo eléctrico



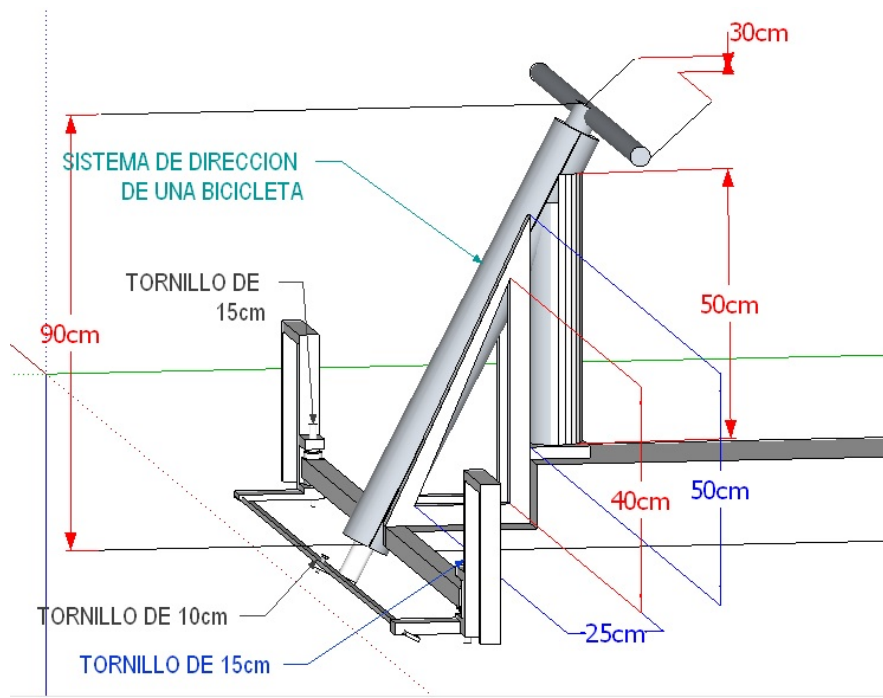


Figura 3.11: Dimensiones del frente del triciclo eléctrico

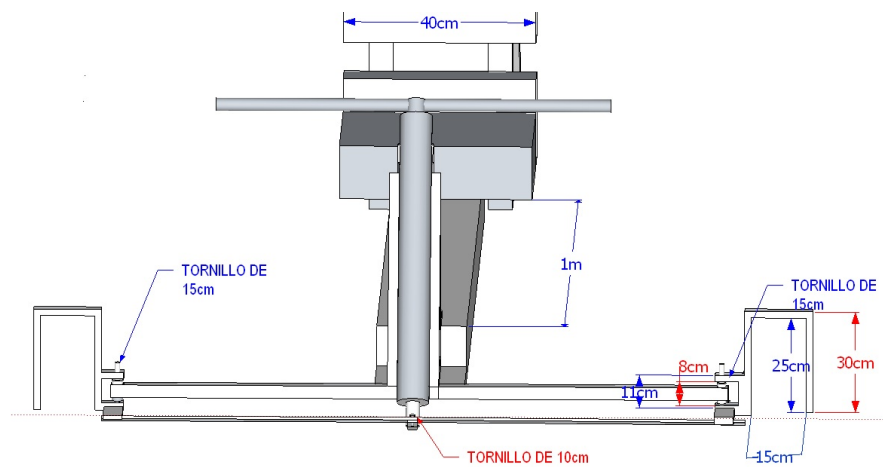


Figura 3.12: Dimensiones del frente del triciclo electrónico

En la figura 3.13, se muestra una vista más amplia de las dimensiones que debe tener la parte donde se monta la llanta de la parte de enfrente del triciclo.

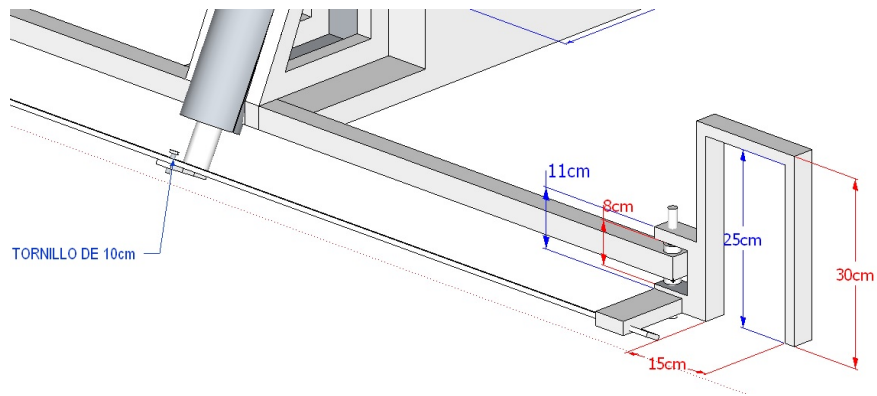


Figura 3.13: Dimensiones para el montaje de las llantas

En la figura 3.14, se muestra el montaje del controlador, el banco de baterías, el cargador de baterías y el panel de control. Aquí hace referencia las partes de color café a la madera que se le pondrá al sistema y el panel de control estará diseñado con acrílico.

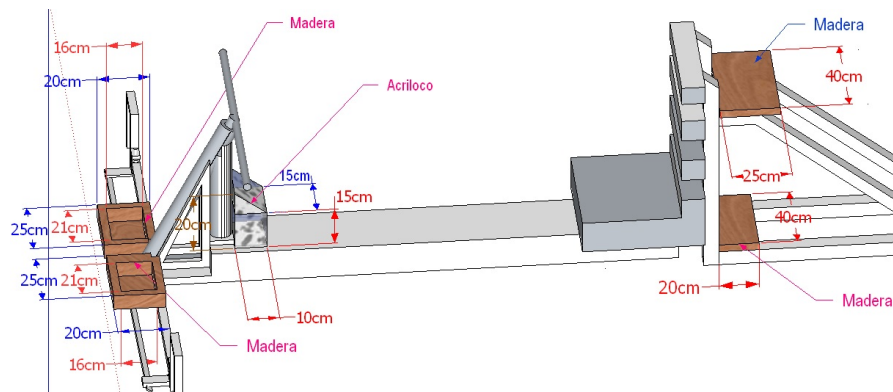


Figura 3.14: Dimensiones de los componentes

### 3.4.2. DIAGRAMA DE BLOQUES DE LAS CONEXIONES ELÉCTRICAS DEL SISTEMA

Las conexiones eléctricas de triciclo eléctrico se basan con respecto a la figura 3.15, es un diagrama de bloque que describe los componentes que tiene el sistema.

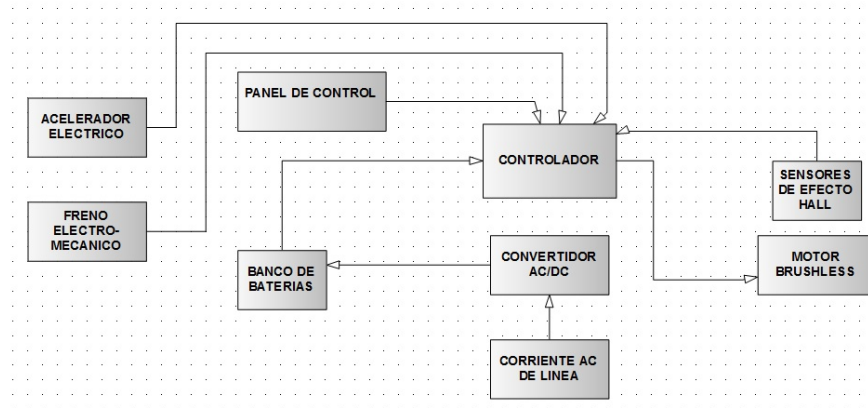


Figura 3.15: Diagrama de bloque del sistema

**Banco de baterías:** La selección de las baterías se dio mediante un análisis económico y de eficiencia de estas. El banco de baterías está conformado por 4 baterías visión de tecnología LFP, esta batería proporciona  $12v/12Ah$ , conectadas en serie para formar los  $48v$  que requiere el motor.

**Acelerador eléctrico:** La selección del acelerador se dio mediante la acoplación al manubrio que se tiene el triciclo eléctrico. Las diferentes posiciones que se tiene en el acelerador harán que aumente la velocidad o disminuya esta.

**Freno electromecánico:** Este freno está conformado por una parte eléctrica y una parte mecánica. Su función eléctrica es muy específica ya que cuando es activado, este desactiva al motor. La función mecánica es ir parando al vehículo eléctrico por medio de un freno de goma instalado en la llanta trasera.

**Panel de control:** En el panel de control está instalado un sistema de botones, donde uno es para ir de frente y otro de reversa, así como un Switch de encendido o apagado del vehículo eléctrico.

**Cargador de baterías:** Las características del cargador de baterías es de  $50v$  a  $2A$ . Suficientes para cargar el banco de baterías de  $48v$ . Está conformado por un convertidor de  $AC/DC$ .

**Controlador:** El controlador está conformado por un inversor trifásico para el motor brushless. Así como la parte del microcontrolador, este recibe las señales de entrada de los sensores de efecto Hall, también recibe las señales que indica si el vehículo va de reversa o de frente y también la señal de  $ON - OFF$  del vehículo eléctrico.

**Motor eléctrico:** Las características del motor eléctrico son de  $48v$  a  $1000w$ . este se encuentra unido a la rueda trasera.

# Capítulo 4

## MOTOR BRUSHLESS

### 4.1. ANTECEDENTES

En 1832 William Sturgeon y Thomas Davenport diseñaron un motor eléctrico en el cual el mayor problema era lograr conmutar la corriente por el magneto. Un motor eléctrico sin escobillas es un motor eléctrico que no emplea escobillas para realizar el cambio de polaridad en el rotor. Los motores eléctricos solían tener un colector de delgas o un par de anillos rasantes. Estos sistemas, que producen rozamiento, disminuyen el rendimiento, desprenden calor y ruido, requieren mucho mantenimiento y pueden producir partículas de carbón que manchan el motor de un polvo que, además, puede ser conductor. [Guzhnay, 2015]

La primera aparición que tuvieron los motores sin escobillas BLDC fue en el año de 1962, a medida que el dispositivo se ha ido refinado para un mejor funcionamiento, se convirtió en una opción popular para aplicaciones especiales.

### 4.2. MOTOR DC SIN ESCOBILLAS

La palabra brushless se puede traducir como “sin escobillas”. En general es un motor que no emplea escobillas para realizar el cambio de polaridad en el rotor. “Los motores de DC sin escobillas, realizan la misma función de un motor de DC con escobillas, pero haciendo un remplazo del conmutador y las escobillas por switches de estado sólido que funcionan con una lógica para la conmutación de los embobinados, se puede concluir que la gran ventaja de los motores de DC sin escobillas es que no necesita de un mantenimiento”[Fraile Mora et al., 2005].

### 4.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Los motores brushless tienen muchas ventajas sobre los motores brushed (con escobillas) como son:

- No se absorbe energía eléctrica por el sistema de excitación de campo (uso de imán permanente), por tanto, no hay pérdidas de excitación lo cual significa un incremento substancial en la eficiencia.
- Relación de par/peso y potencia/peso de salida alta en comparación con el uso de excitación electromecánica.
- Mejor desempeño dinámico que otros motores (alta densidad de flujo magnético en el entre hierro).
- Excelente control en el rango completo de par-velocidad. Robustez y funcionalidad.
- Simplificación de la construcción y mantenimiento.

Las desventajas de un motor brushless:

- Mayor costo de construcción
- El control es mediante un circuito caro y complejo
- Siempre hace falta un control electrónico para que funcione, con esto se duplica el costo.

Ahí encontramos la explicación de la diferencia de precio entre modelos Brushless y los Brushed.

Desventajas de un motor brushed son:

- Requiere mantenimiento periódico.
- Poco poder de disipación de calor.
- La relación velocidad/par motor es relativamente plana pero a altas velocidades, la fricción de las escobillas aumenta y reduce el par motor útil.
- Rotor con mucha inercia, lo cual limita los cambios de velocidad.
- Menor rango de velocidad, limitado por las escobillas.

## 4.4. TIPOS DE MOTORES BRUSHLESS

Los motores BLDC se fabrican de dos tipos los inrunner y los outrunner. En los inrunners los imanes están en el eje, están rodeados por el embobinado de cobre, estos son más eficientes y potentes. Estos pueden girar con mucha rapidez pero con menos torque que un motor de tipo outrunner.

En los motores outrunner el embobinado está en el eje y los imanes pegados a la carcasa, el hecho de tener los imanes más alejados del eje y el peso de la carcasa hace que actúe como un volante de inercia, por lo general producen menos rpm's que un inrunner.

Estos motores trabajan por medio de variadores, también llamados controladores de velocidad que transforman la corriente continua de las baterías en una tensión alterna trifásica y la que alimenta las bobinas en ciertas secuencias dependiendo la posición del rotor.

En este proyecto se utilizará un motor con características outrunner, realizando un control básico de velocidad para este motor y cualquier otro con características similares. Para la realización de este controlador, es necesario saber la posición del rotor en cada momento, por lo que existen dos técnicas básicas para el control, que a continuación se describe:

- Con sensores (sensored): disponen de los sensores de efecto hall o encoders que indican la posición del rotor. Es habitual que tengan 3 sensores separados  $120^\circ$ .
- Sin sensores (sensorless): no tiene sensores; la posición se determina mediante la medición del efecto de la fuerza contra electromotriz sobre las bobinas.

## 4.5. FUNCIONAMIENTO

Actualmente, los motores brushless de corriente directa se emplean tanto en sectores industriales como de consumo, uno de los usos más comunes que se les da a estos motores es en los vehículos eléctricos. El motor BLDC es básicamente un motor síncrono trifásico que tiene un rotor con imanes permanentes. Los devanados del estator son alimentados con tensiones de manera que el imán permanente del rotor sigue los campos magnéticos creados por los devanados del estator, esto se puede apreciar en la figura 4.1.

La construcción de los motores sin escobillas es muy similar a la construcción de los motores de AC. Los motores sin escobillas son un tipo de motores síncronos, esto quiere decir que el campo magnético generado por el estator y el campo magnético generado por el rotor hace que giren en la misma frecuencia, con esto se evita el deslizamiento que se da normalmente en los motores de inducción. Los motores sin escobillas pueden tener una configuración de una, dos o tres fases. Este número de fases nos indica el número de devanados que tiene el estator.[Chapman et al., 2012]

Básicamente el funcionamiento del motor BLDC es dejar una de sus fases en positivo y otra en negativo, dejando la tercera sin conectar y haciendo las combinaciones adecuadas de las fases del motor, este puede girar en sentido horario o anti horario.

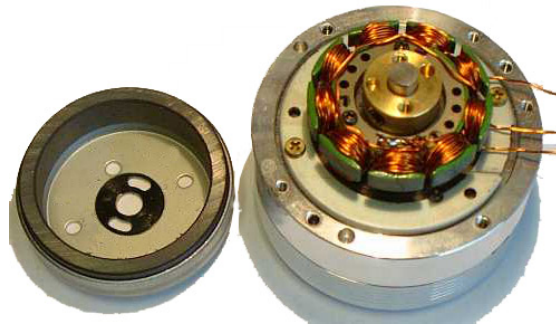


Figura 4.1: Motor Brushless o sin escobillas tipo outrunner [Keeping, 2013]

## 4.6. ESTATOR

El estator de un motor brushless outrunner se encuentra formado por láminas apiladas de acero y los devanados están colocados en las ranuras, estas láminas se encuentran a lo largo del estator como se muestra en la figura 4.2.

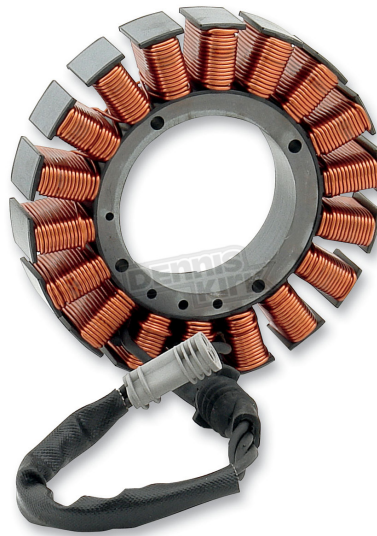


Figura 4.2: Estator de un motor Brushless tipo outrunner

La parte del estator del motor BLDC es casi idéntica que la de un motor de inducción, sin embargo los devanados se distribuyen de manera diferente. La mayoría de los motores brushless tienen tres devanados en el estator conectados en estrella.

Cada uno de estos devanados se construye con numerosas bobinas para formar un devanado. Estos devanados se distribuyen en la periferia del estator para formar un número par de polos.

## 4.7. ROTOR

El rotor es un elemento magnético permanente, está formado por imanes que pueden variar sus pares de polos. Como en la figura 4.3 donde se muestra los pares de polos.

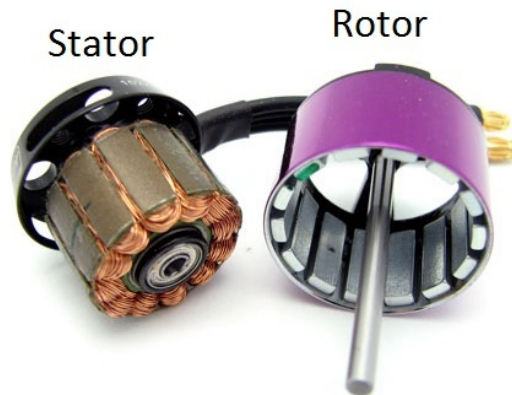


Figura 4.3: Rotor de un motor Brushless outrunner

Dependiendo de la cantidad de campo magnético requerida en el rotor, se elige el material magnético adecuado para hacer el rotor. El material magnético adecuado son los imanes de ferrita y material de aleación, los imanes de ferrita al ser menos costosos tiene la desventaja de tener una densidad de flujo baja, en cambio, el materia de aleación tiene alta densidad magnética, permite al rotor tener el mismo par. Una de las ventajas de este tipo de material de aleación sobre los imanes de ferrita, es que mejoran la relación de tamaño-peso y dan mayor par.[Chapman et al., 2012]

En las maquinas eléctricas se usan materiales ferromagnéticos para dar forma a los campos, de modo que se hacen máximas las exigencias de producción de par. Estos materiales poseen las características de oponerse a la inversión del sentido de la imanación una vez imanados, un aumento del campo magnético les origina una variación de flujo diferente de la variación que originaría una disminución igual de campo magnético. Este atributo indica que las relaciones que expresan la inducción magnética y la permeabilidad como funciones del campo magnético, no son lineales ni uniformes.

## 4.8. SENSORES DE EFECTO HALL

El efector hall consiste en la aparición de una diferencia de potencial transversal en un conductor o un semiconductor, por el cual circula corriente cuando hay un campo magnético aplicado en dirección perpendicular a esta.

En la figura 4.4 muestra una lámina semiconductora, esta tiene las características de tener un espesor  $t$ , a la cual atraviesa una corriente  $I$ . Cuando esta tiene presencia de campo magnético de densidad  $B$ , los electrones se van sometiendo a una fuerza de Lorentz, teniendo como resultado una diferencia de potencial en la salida  $V_H$ . La carga que se ve sometida a una fuerza electromagnética  $F=q(vxB)$  debido a la carga, puede desplazarse hacia la parte superior de la lámina, quedando polarizada negativamente y la parte inferior positivamente.

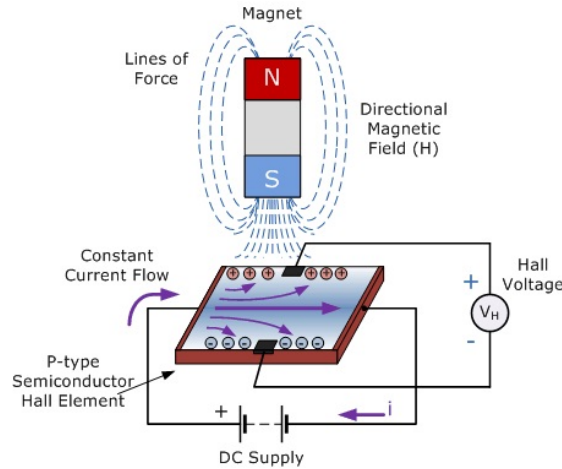


Figura 4.4: Lamina Semicinductora [Tutorials, 2016]

En la mayoría de los motores BLDC se tienen tres sensores Hall, los sensores se ubican en el estator. Cuando pasan por los sensores Hall los polos magnéticos N o S del rotor mandan una señal, esta señal se puede apreciar en la figura 4.5. Basándonos en la combinación de estas tres señales del sensor de efecto Hall, se puede determinar la secuencia exacta de conmutación.

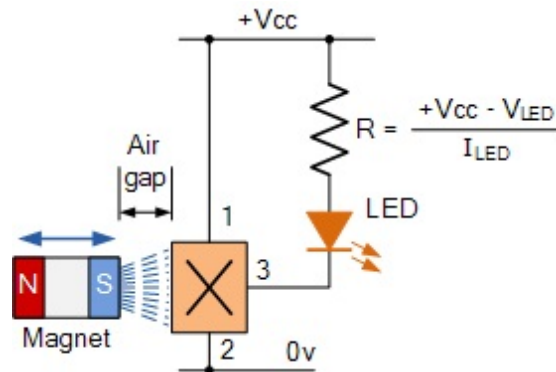


Figura 4.5: Funcionamiento del sensor Hall [Tutorials, 2016]

Los sensores Hall vienen incorporados en la parte fija del motor como se muestra en la figura 4.6. La incorporación de estos sensores Hall en el estator es un

proceso complejo, ya que cualquier desajuste en estos sensores con respecto a los imanes del rotor, generan un error en la determinación de la posición del rotor.

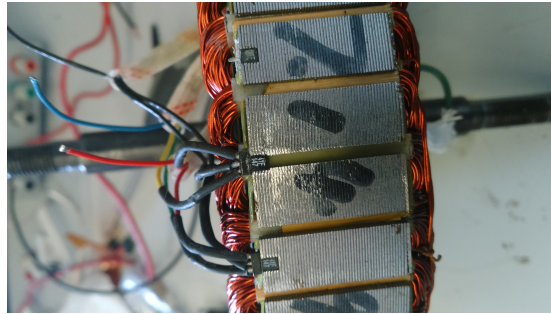


Figura 4.6: Ubicación de los sensores de efecto Hall [Bike, 2013]

En algunos motores además de los imanes del rotor principal, pueden tener los imanes del sensor Hall en el rotor esto para simplificar el proceso de montaje. Con esto cada vez que el rotor gira, los imanes del sensor Hall crean el mismo efecto que los imanes principales.

En la figura 4.7 se muestra el funcionamiento de los sensores Hall, en particular el dispositivo A1101EUA que fue el que se utilizó en el sistema. En el punto 1 se asume que el dispositivo enciende, pero no manda la señal, si no hasta el siguiente paso, en el punto 2 se asume que el estado es correcto, en ese momento toma como  $V_{out}$  como un ALTO, en el punto 3 sigue tomando como un ALTO a  $V_{out}$ , en el punto 4 es cuando la unidad de control toma como un alto la salida del dispositivo y en el punto 5  $V_{cc}$  es retirado del dispositivo, esto es para ahorrar energía de la batería.

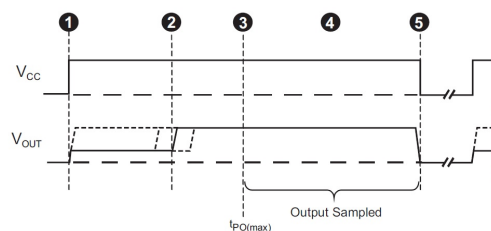


Figura 4.7: Funcionamiento del sensor hall A1101EUA

## 4.9. CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR BRUSHLESS (BLDC) UTILIZADO

Los motores típicos de hoy en día para vehículos eléctricos tienen el motor montado en los neumáticos en la parte de enfrente o en la parte trasera del vehículo,

suelen operar entre los  $36v$  y los  $48v$ . Este voltaje es suficiente para poder llegar a tener los  $50km/h$  si se trabaja con los  $48v$  o  $40km/h$  si se trabaja con  $36v$ . Una de las características del motor sin escobillas es que tiene 46 polos o 23 pares de polos.

#### 4.9.1. ESPECIFICACIONES DE FUNCIONAMIENTO

En el cuadro 4.1 muestra las condiciones con las que va a elaborar el controlador, en base a la potencia del motor, ya que con el amperaje y el voltaje podemos llegar a tener un nivel de giro rápido o lento. Se puede elegir entre diferentes controladores de  $17A$ ,  $22A$  y  $27A$ . Estos aportan cierta potencia o nivel de consumo máximo.

TIPO DE CONTROLADOR[A]	CONSUMO MÁXIMO A $36v$	CONSUMO MÁXIMO A $48v$
17	$612W$	$4816W$
22	$792W$	$1056$
27	$972$	$1296$

Cuadro 4.1: Nivel de potencia del motor por el controlador

Las velocidades máximas que ofrece el motor con una persona de  $85kg$  son las que se muestra en el cuadro 4.2, teniendo las baterías cargadas y con la rueda que tenemos de  $26''$ .

TIPO DE MOTOR	VELOCIDAD MÁXIMA A $36v$	VELOCIDAD MÁXIMA A $48v$
7x9	$30km/h$	$40km/h$
8x8	$35km/h$	$44km/h$
9x7	$38km/h$	$49km/h$

Cuadro 4.2: Nivel máximo de velocidad

En el cuadro 4.3 muestra los RPM según el voltaje de las baterías.

TIPO DE MOTOR	REVOLUCIONES MÁXIMAS A 36v	REVOLUCIONES MÁXIMAS A 48v
7x9	230rpm	320rpm
8x8	280rpm	380rpm
9x7	330rpm	420rpm

Cuadro 4.3: Nivel máximo de revoluciones

El motor se eligió por que ya venia montado el motor en el neumatico, el motor que tenemos es un motor de 9x7 de gran velocidad debido a sus altas revoluciones, por lo que es adecuado en zonas llanas. Este motor tiene especificaciones de 48v a 1000w, con un rin de 26" como se muestra en la figura 4.8.



Figura 4.8: Rueda con radio de 26" y con motor de 9x7 a 48v

#### 4.9.2. PARTES DEL MOTOR BLDC UTILIZADO

La idea general de nuestro motor de corriente continua sin escobillas se separa en dos partes una el rotor y la otra el estator, esto se puede apreciar en la figura 4.9.

El rotor del motor como se muestra en la figura 4.10, es la parte que gira, este consiste en un círculo de metal, llamado "back iron" ya que esta echa de aleación



Figura 4.9: Motor BLDC

de hierro y se une una parte interior de imanes con polos alternantes en dirección hacia dentro y hacia afuera.



Figura 4.10: Rotor

El estator es el que se encuentra estático como se observa en la figura 4.11, está fabricada a partir de una serie de placas apiladas de acero que se mecanizan con unas muescas que crean dientes y cada muesca tiene bucles de bobina de cobre.



Figura 4.11: Estator

En las figuras 4.13 y 4.12, se observan el rotor y el estator del motor así como se embobinado que tiene.

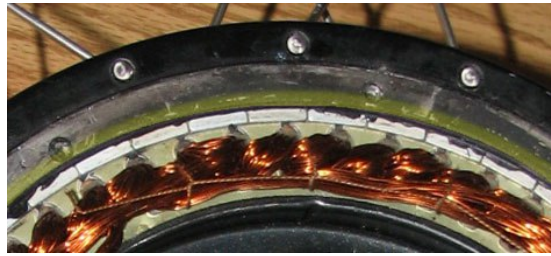


Figura 4.12: Rotor y estator en el motor

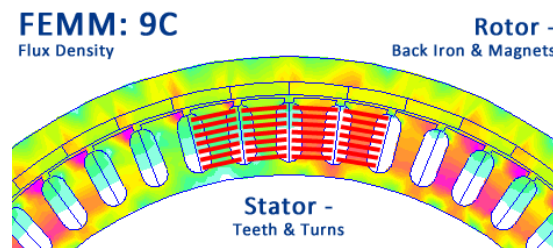


Figura 4.13: Rotor y Estator

Los sensores de efecto Hall son sensores integrados en el estator y proporciona el posicionamiento del rotor, se puede apreciar en la figura 4.14.

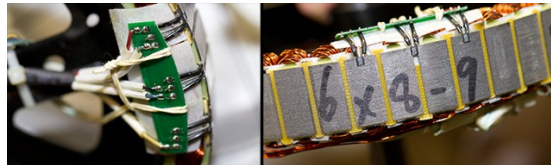


Figura 4.14: Sensores Hall

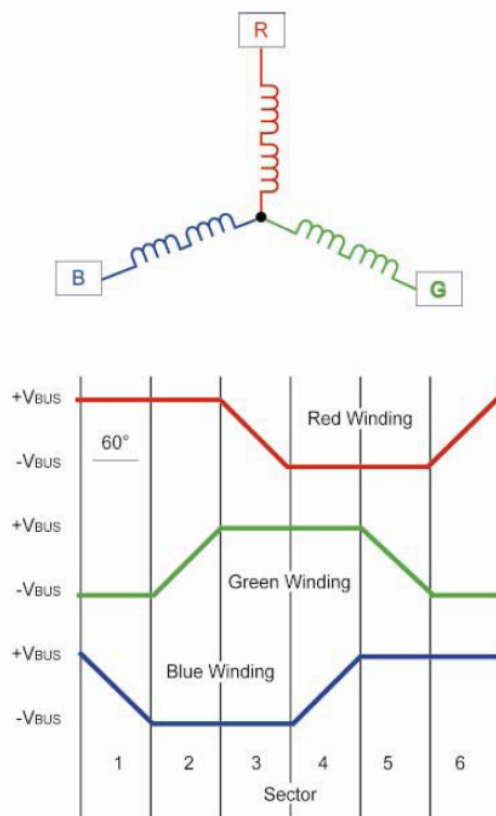
## 4.10. CONTROL DE MOTOR BRUSHLESS

En el control para el motor brushless existen 3 tipos el trapezoidal, senoidal y el vectorial. Para el control del motor BLDC que se ocupó para este proyecto, se eligió el control trapezoidal ya que es un control fácil de manejar a la hora de programar.

### 4.10.1. CONTROL BASADO EN LA CONMUTACIÓN TRAPEZOIDAL

El control trapezoidal es uno de los controles para motores brushless más simples, las distintas bobinas se excitan con el polo positivo o el negativo para generar un campo magnético en una sola dirección o en la dirección opuesta, esto puede provocar una rotación del rotor, se puede apreciar en la figura 4.15.

En este esquema se controla la corriente que circula por los devanados del motor, excitando dos devanados simultáneamente y manteniendo el tercer devanado desconectado, completando las seis combinaciones posibles.



**Figure 1: BLDC motor windings and trapezoidal waveforms**

Figura 4.15: Conmutación de los devanados

La figura 4.16 muestra el diagrama de bloques de un controlador trapezoidal con lazo cerrado, donde los sensores Hall situados en el motor son utilizados para proporcionar la posición aproximada del rotor al controlador.

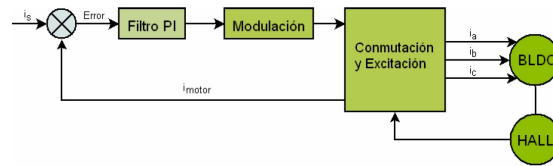


Figura 4.16: Diagrama de bloques de un controlador trapezoidal

Con esta técnica se consigue mantener constante la corriente que circula por cualquiera de los bobinados. Donde se compara la corriente que circula por el par de terminales, esta es comparada con la corriente deseada y este error de comparación es aplicado a un filtro PI.

Lo que va a intentar realizar el controlador es corregir la desviación y por tanto minimizar el error.

Existe un rizado que dificulta el control de motores brushless, debido al vector de corrientes solo puede apuntar en seis direcciones se produce una desalineación entre esta y la posición del rotor. Esto puede ocasionar desgaste mecánico, ruido y el tiempo de vida del motor se reduce.

En aplicaciones que demanden movimientos a baja velocidad se hace notable este rizado provocando una disminución en la precisión de los movimientos. La desalineación que provoca el rizado en el par del motor es de aproximadamente el 15%. En el peor de los casos, cuando se encuentre el rotor en una posición intermedia de unos de los 6 sectores, la desalineación puede llegar a ser de 30 grados.

# Capítulo 5

## IMPLEMENTACION DEL VEHÍCULO

### 5.1. CONTROLADOR

Para realizar la activación sobre el motor brushless se diseñó un circuito Inversor trifásico como el que se muestra en la figura 5.1. El inversor tiene MOSFET en la parte de alta (Q1, Q3, Q4) y MOSFET en la parte de baja (Q2, Q4, Q6), la función del control es encender y apagar a los MOSFETs para que la corriente siga un camino entre dos MOSFET de los tres embobinados del motor.

En esta activación del motor brushless, se usará un microcontrolador ds-PIC30F4011. Por las características de este microcontrolador hace que la activación de motores sea eficiente.

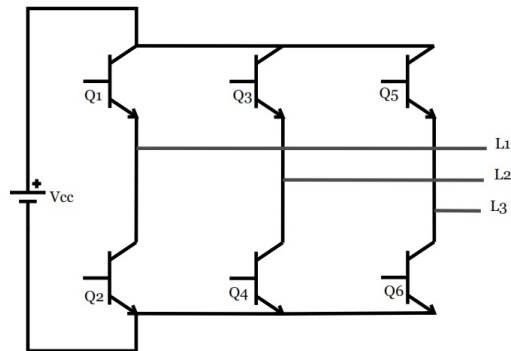


Figura 5.1: Mosfets del inversor trifasico

### 5.1.1. MICROCONTROLADOR DSPIC30F4011

Se le denomina microcontrolador a un circuito integrado programable, este es capaz de realizar diferentes actividades que se requieran en un procesamiento de datos digitales, así como el control y la comunicación digital de diferentes dispositivos. Podemos encontrar en los microcontroladores, un generador de reloj integrado, una variedad de puertos de entrada/salida, estos puertos de entrada/salida se pueden configurar como convertidores de analógica digital (CAD) y también pueden ser digital analógico (CDA), temporizadores, entre otros. Como podemos ver un microcontrolador es un circuito integrado programable, este es capaz de ejecutar las ordenes que se le graban en la memoria. Es básico saber que el microcontrolador está compuesto por varios bloques funcionales, los cuales cumplen con una tarea específica a realizar.

Las características que cumplen estos es que se diseñan los microcontroladores para reducir el costo económico y el consumo de energía de un sistema en particular. Por eso el tamaño de la CPU, así como la cantidad de memoria y los periféricos incluidos dependerán de la aplicación. Estos podemos encontrarlos en electrodomésticos sencillos, por ejemplo, una batidora utiliza un procesador de muy pequeño de 4 u 8 bits, en cambio un reproductor de música y/o video digital requerirá de un procesador de 32 bits o 64 bits y uno o más códec de señal digital (AUDIO / VIDEO).

El control de un sistema de frenos ABS (AntilockBrakeSystem) se basa normalmente en un microcontrolador de 16 bits, al igual que un sistema de control electrónico del motor de un automóvil.

Algunos de estos microprocesadores, están diseñados específicamente para aplicaciones de control de motores. Son los primeros PICs con un bus de datos inherente de 16 bits. Estos microprocesadores añaden todas las características de los anteriores PICs y cuentan con varias operaciones de DSP implementadas en hardware como multiplicación con suma de acumulador, barrelshifting, multiplicación de 16x16 bits.

El microcontrolador utilizado en este proyecto es el dsPIC30F4011, como se muestra en la figura 5.2. Unos de sus principales atributos que tiene este microcontrolador es que tiene 3 pares de canales de PWM, suficientes para controlar a un motor brushless.

El modelo dsPIC30F4011 con 28 pines, además cuenta con las siguientes características principales:

- Rango e operación de voltaje de 5v.
- Ruta de datos de 16 bits.
- El ancho de las instrucciones es de 24 bits.
- 32k byts de memoria.
- 6 canales de PWM.
- Convertidor de Analógico a digital (CAD) de 10 bits.

## Pin Diagrams

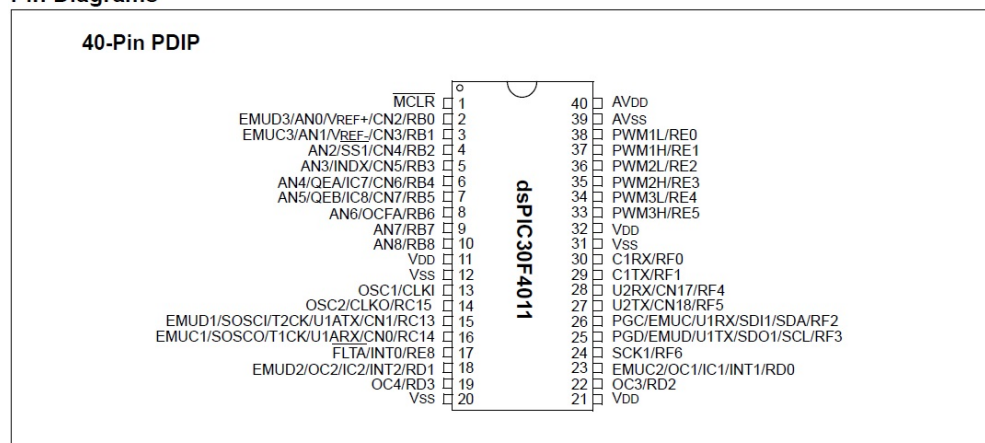


Figura 5.2: Esquema del dsPIC30F4011

Una vez realizado el esquema de conexiones de la figura 5.3. La programación del microcontrolador debe ser capaz de:

- Leer la señal que envían los sensores Hall.
- Determinar la posición del rotor a partir de la lectura de los sensores.
- Leer entradas analógicas
- Generar los pulsos PWM para el control del puente trifásico.
- Conmutar los transistores correspondientes del puente trifásico.
- Frenar el motor según la consigna de frenado.
- Cambiar de giro el motor cuando el usuario lo requiera

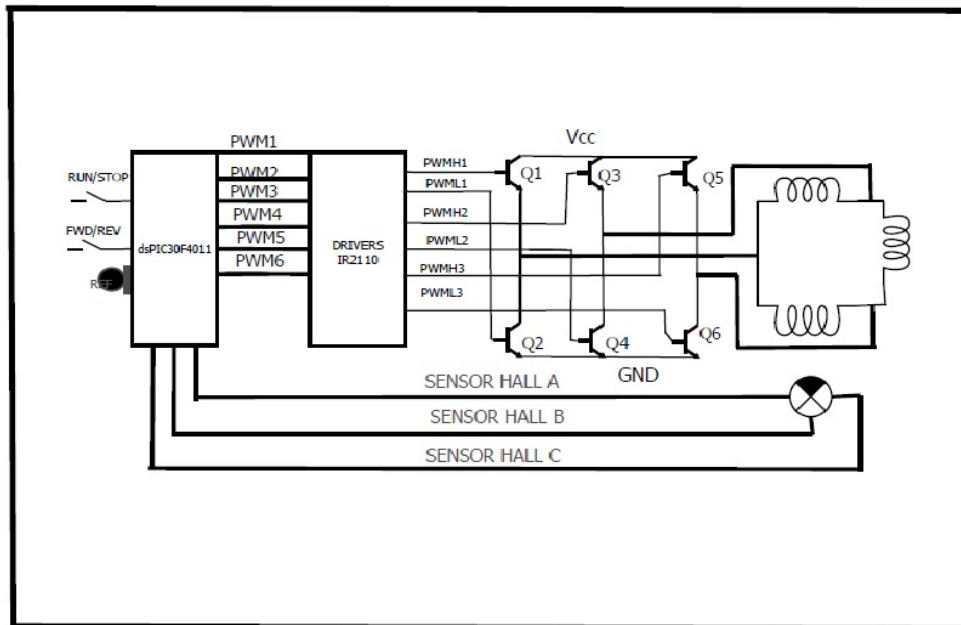


Figura 5.3: Esquema de conexiones

### 5.1.2. ADAPTACIÓN DE LOS SENSORES DE EFECTO HALL

En el cuadro 5.1 indica el giro del motor, en esta tabla indica que el motor puede girar en sentido horario y en el cuadro 5.2 indica el giro del motor en sentido anti-horario, estas tablas fueron diseñadas a partir de pruebas que se le realizaron al motor brushless. Más que nada nos indica la posición del rotor, si esta se encuentra en un estado como pasar al siguiente estado haciendo conmutar a los MOSFET de cada rama del puente trifásico.

SECUENCIA	SENSORES HALL			ACTIVACION MOSFET					
	S1	S2	S3	L1	H1	L2	H2	L3	H3
				Q2	Q1	Q4	Q3	Q6	Q5
6	1	1	0	0	0	0	1	1	0
2	0	1	0	1	0	0	1	0	0
3	0	1	1	1	0	0	0	0	1
1	0	0	1	0	0	1	0	0	1
5	1	0	1	0	1	1	0	0	0
4	1	0	0	0	1	0	0	1	0

Cuadro 5.1: Secuencia de la rotación del motor en sentido horario.

SECUENCIA	SENSORES HALL			ACTIVACION MOSFET					
	S1	S2	S3	L1	H1	L2	H2	L3	H3
				Q2	Q1	Q4	Q3	Q6	Q5
4	1	0	0	0	1	0	0	1	0
5	1	0	1	0	1	1	0	0	0
1	0	0	1	0	0	1	0	0	1
3	0	1	1	1	0	0	0	0	1
2	0	1	0	1	0	0	1	0	0
6	1	1	0	0	0	0	1	1	0

Cuadro 5.2: Secuencia de la rotación del motor en sentido anti-horario.

Para la habilitación de cada fase del motor, se debe ir activando a los MOSFETs, para entender mejor las habilitaciones en cada fase, tenemos la figura 5.4, nos muestra los estados altos y bajos que puede tener cada fase del motor dependiendo de la posición de los sensores Hall.

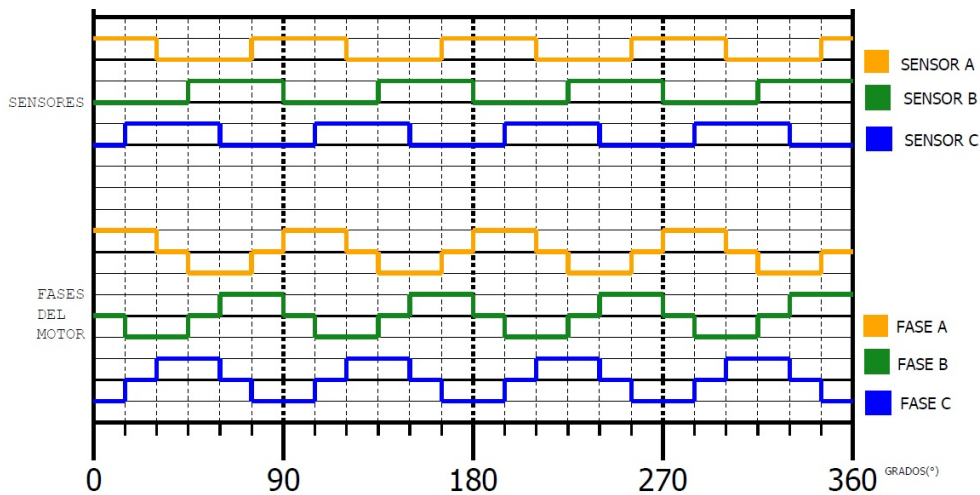


Figura 5.4: Fases de las bobinas con respecto a los sensores

La figura 5.4, nos indica el tren de pulsos que siguen los sensores Hall, así como el accionamiento del motor brushless por cada fase, también podemos ver en cada 90° es un cuarto de vuelta y el accionamiento de las fases se repite, lo que podemos deducir que podemos trabajar con el rango de 0 a 90° para fines prácticos y solo repetir para las demás fases en el caso de 90° a 360° que es cuando da la vuelta completa el motor brushless.

### 5.1.3. DIAGRAMA DE BLOQUES

El diseño del sistema del microcontrolador se basó del siguiente diagrama de bloques, este se muestra en las figuras 5.5 , 5.6 , 5.7.

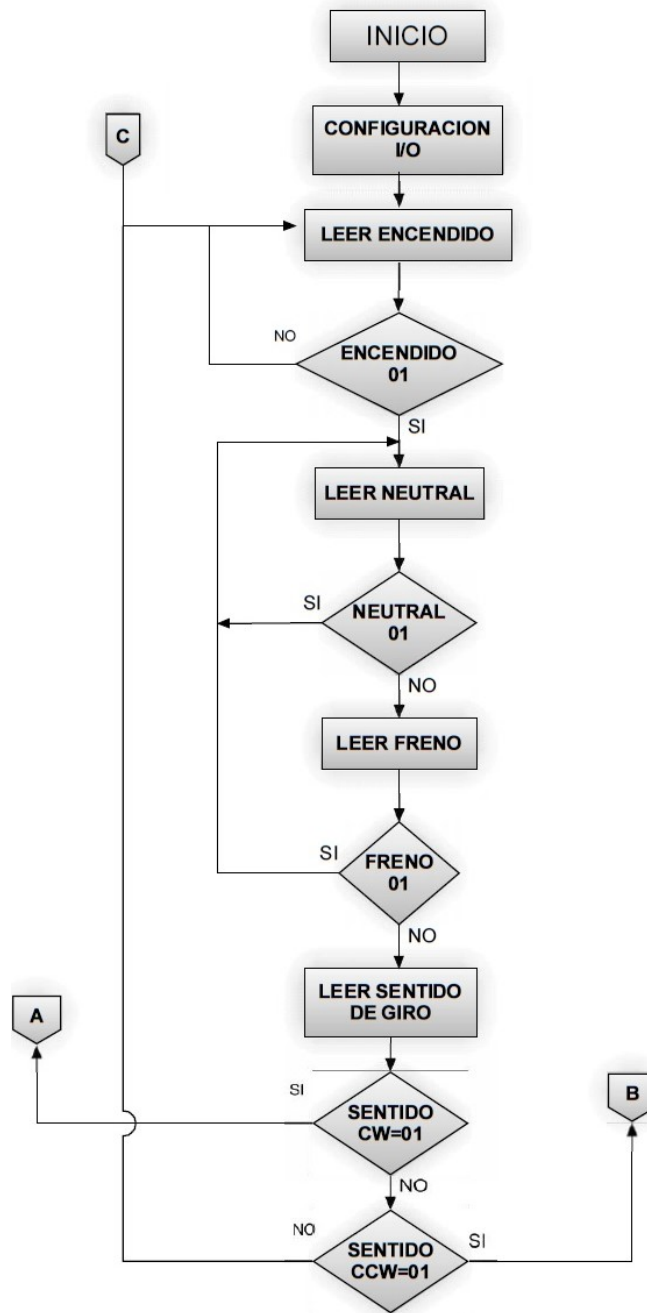


Figura 5.5: Diagramas de bloques de las entradas

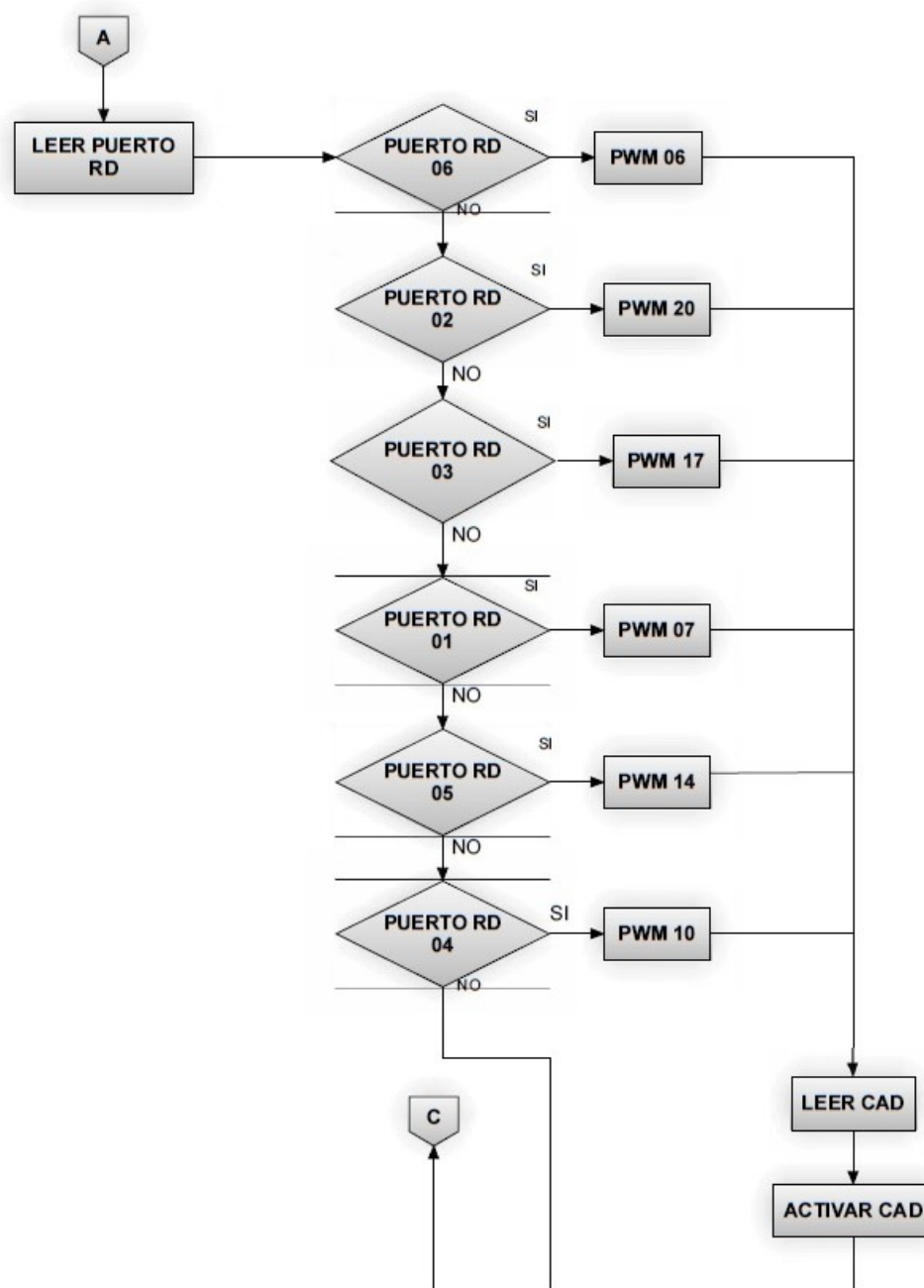


Figura 5.6: Diagrama de bloques del sentido horario

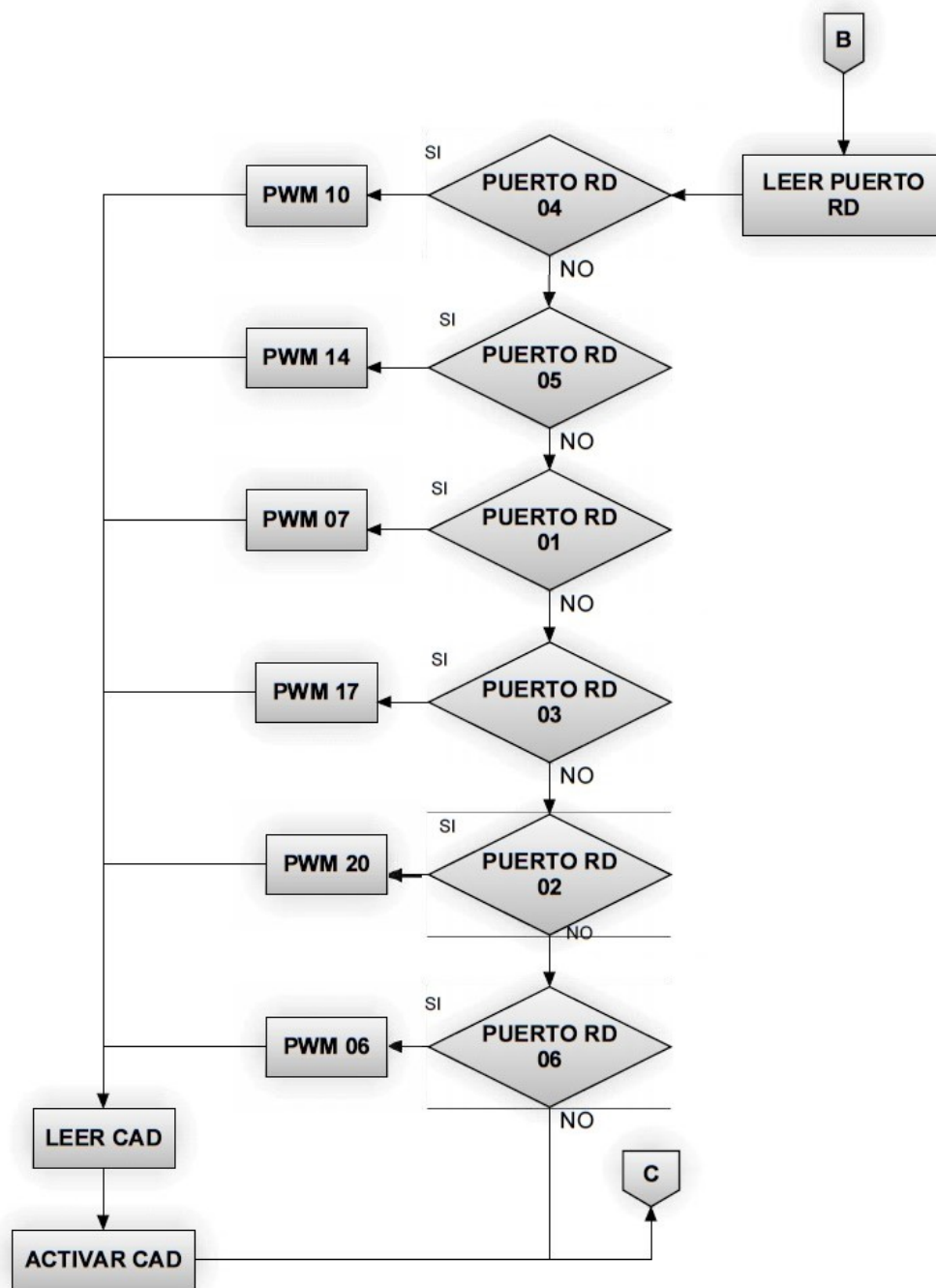


Figura 5.7: Diagrama de bloques del sentido anti-horario

#### 5.1.4. PROGRAMACION DEL CONTROLADOR

Una vez que se tiene la comunicación del panel de control, freno electromecánico y acelerador electrónico con el microcontrolador, se procede a la manipulación de los datos enviados de estos, para que el dsPIC active las salidas digitales que está requiriendo el motor para poder trabajar como se espera.

Las entradas digitales del sistema son:

- Encendido
- Avanzar
- Retrocede
- Neutral
- Sensores de efecto Hall
- Freno electromecánico

Las entradas analógicas del sistema son:

- Acelerador electrónico

Las salidas del sistema son:

- Señales PWM
- Señal de freno
- Señal de avanzar
- Señal de Neutral

Mientras el vehículo no halla encendido, no se podrá hacer ninguna maniobra sobre este, una vez que el vehículo es encendido la comunicación con el microcontrolador se activa y el vehículo se encuentra en un estado Neutral (el vehículo no se mueve). Se eligió que para poder arrancar al vehículo entre en el estado de Avanzar, es aquí cuando la lectura de los sensores de efecto Hall indican la posición del rotor del motor y a su vez activan las señales PWM que energizaran al motor pasando por un bloque que contiene drivers e inversor trifásico. Esto se muestra en el cuadro 5.1.

La función del acelerador electrónico es acelerar y desacelerar al vehículo, es aquí cuando se activa el modulo del convertidor analógico digital (CAD), haciendo que varíe el ancho de pulso del PWM.

La activación del freno electromecánico se da cuando el usuario quiere detener al vehículo, la función de este es desactivar a los PWM mandándolos a un estado bajo y cuando el freno es desactivado las salidas PWM son activadas y el vehículo avanza de forma normal.

Cuando se activa la función de Retroceder, el vehículo eléctrico ahora va en sentido inverso y la función que hacía en el estado encendido es prácticamente el mismo, pero con la lectura de los sensores y la activación de los PWM en sentido inverso. Este se muestra en el cuadro 5.2.

## 5.2. MODULACION PWM PARA MOTOR BRUSH-LESS

El funcionamiento básico de la modulación por ancho de pulso es simple, una serie de pulsos cuyo ancho es controlado por la variable de control. Es decir, que si la variable de control se mantiene constante o varía muy poco, entonces el ancho de los pulsos se mantendrá constante o variará muy poco respectivamente como se muestra en la figura 5.8.

La modulación por ancho de pulso, es una técnica para regular la velocidad de un motor eléctrico. El tamaño del pulso PWM es eficiente para el control de estos motores, aplicado a motores brushless utilizan los pulsos para excitar a los MOSFET de baja y alta de los inversores trifásicos.

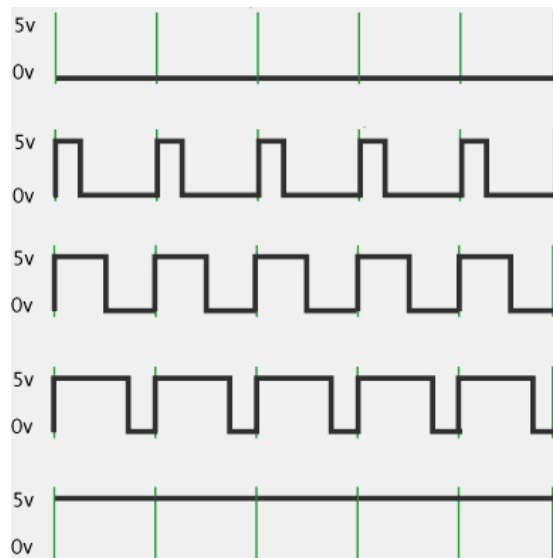


Figura 5.8: Modulación PWM [Ramos, 2013]

### 5.3. CONVERTIDOR ESTÁTICO

Los diferentes sistemas que procesan la energía suelen denominarse convertidores estáticos o simplemente convertidores de energía. Las diferentes situaciones en que el motor puede adaptar, pasando por un proceso de motor a generador y de generador a motor, hay dispositivos que permiten realizar estos cambios electrónicos, como es el inversor.

Se puede decir que los elementos que constituyen a los convertidores estáticos de potencia son fundamentalmente de dos tipos:

- **Interruptores estáticos:** Son elementos semiconductores de potencia que actúan como interruptores y son llamados elementos no lineales.
- **Elementos reactivos:** Son condensadores, inductores y transformadores, son responsables por el almacenamiento y aislamiento (en el caso de los transformadores) de la energía y el filtrado de las tensiones y corrientes.

### 5.3.1. CLASIFICACION DEL CONVERTIDOR ESTÁTICO

En función del tipo de energía en la entrada y en la salida del convertidor, lo podemos clasificar de la siguiente forma:

- **Rectificador no controlado:** transforma la corriente alterna de tensión constante en corriente continua de tensión variable. Está formado por diodos.
- **Rectificador controlado:** transforma la corriente alterna de tensión constante en corriente continua de tensión variable. Formado por tiristores.
- **Reguladores AC:** transforma la corriente alterna de tensión constante en corriente alterna de tensión variable y de la misma frecuencia.
- **Cicloconvertidores:** reguladores de alterna o convertidores directos alterna/alterna de distinta frecuencia.
- **Ondulador autónomo o inversor:** transforma la corriente continua en corriente alterna de frecuencia fija o variable.
- **Convertidor CC/CC o Troceador:** transforma la corriente continua de tensión constante en corriente continua de tensión variable.

## 5.4. PUENTE TRIFASICO

Para motores trifásicos, como es el caso de los motores brushless, los inversores trifásicos son más convenientes, estos cuentan con un sistema de 6 transistores como se muestra en la figura 5.9. Estamos hablando de un sistema que, mediante 3 inversores monofásicos en puente, estos pueden ir cambiando continuamente para poder hacer que el motor gire en el sentido que uno elija.

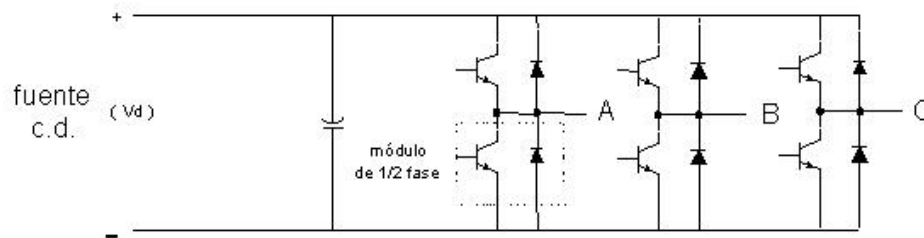


Figura 5.9: Puente trifásico [Turmero, 2016]

## 5.5. DISEÑO DEL PUENTE TRIFÁSICO Y DRIVERS

Para realizar el control trapezoidal sobre el motor brushless, diseñamos un circuito inversor para motores trifásicos, los cuales cuenta con seis MOSFETs, estos son los permiten el accionamiento entre los embobinados del motor. En nuestro sistema, la señal PWM se genera por medio del microcontrolador, como esta no tiene la tensión suficiente como para activar estos MOSFETs, por lo que nos damos a la tarea de diseñar o utilizar drivers que nos permitan alcanzar el voltaje suficiente para la activación de los MOSFETs.

### 5.5.1. SELECCIÓN DE LOS MOSFETs

Como se ha mencionado anteriormente el puente trifásico se diseñará con MOSFETs, las características que se van tener estarán limitadas a las características que tiene el motor brushless, con 48v y 1000w de potencia.

Los MOSFETs con los que se trabajara para la realización del puente trifásico pueden ser MOSFETs canal N, algunos puentes trifásicos ocupan MOSFETs canal P, lo ideal es ocupar los MOSFETs canal N ya que estos se encienden cuando aplicas un voltaje positivo en el terminal de la compuerta, el siguiente cuadro 5.3 muestra una lista de MOSFETs que se pueden utilizar para el sistema, en particular utilizamos el MOSFET STP80NF70, ya que sus características se adecuan al lo que puede llegar a exigir el motor brushless. .

TIPO	CORRIENTE [ $I_D$ ]	$V_{DS}[v]$
IRF1310N	42	100
IRF3710	57	100
IRF540	28	100
IRF540N	30	100
IRF1407	130	75
IRF3808	140	75
IRFB4227	65	200
RFP40N10	40	100
STP80NF70	95	68

Cuadro 5.3: Mosfet más comerciales



Para la configuración del driver, nos apoyaremos en la hoja de especificaciones del driver IR2110, ya que aquí nos indican todas las configuraciones para que el driver trabaje de forma correcta, en la figura 5.11 se muestra que la activación de las salidas  $H_o$  y  $L_o$  se necesita que SD este en bajo.

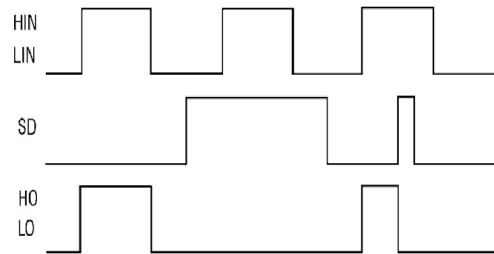


Figura 5.11: Diagrama entrada-salida

Otra de las cosas que se debe tomar en cuenta a la hora de hacer el diseño del driver, es ver que los niveles de tensión que arroja el microcontrolador son valores de 5v y por consecuencia se debe configurar el driver para que tome estos valores lógicos, lo ideal es que se alimente  $V_{DD}$  con 5v, en la figura 5.12 se puede ver claramente los valores ideales de la configuración de  $V_{DD}$ .

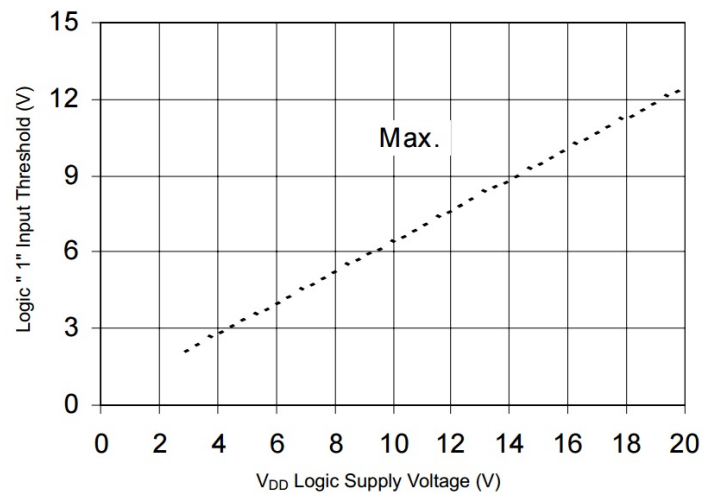


Figura 5.12: Limites de entrada

Dentro del datasheet del driver IR2110 viene unas condiciones de operación que son recomendadas por los fabricantes, aquí nos indican que  $V_{cc}$  trabaja como mínimo 10v y como máximo 20v, entonces la fuente con la que trabajaremos será

la de una batería de 12v y ese voltaje es el que se le suministrara a  $V_{cc}$ . La fuente flotante VB trabaja igual que  $V_{cc}$  y esta tendrá el mismo valor de la batería de 12v.

Para tener una tension constante en la parte flotante del driver, se seleccionara el capacitor de bootstrap de la siguiente forma:

$$C \geq \frac{2[2Q_g + \frac{I_{qbs(max)}}{f} + Q_{Is} + \frac{I_{cbs(leak)}}{f}]}{V_{cc} - V_f - V_{LS}}$$

Donde:

- $Q_g$  carga para encender el mosfet.
- $I_{qbs(max)}$ = Corriente de polarización, circuitos de la parte de alta
- $I_{cbs(leak)}$ = corriente de fuga para el capacitor BOOTSTRAP
- $Q_{Is}$ = Carga del cambio de nivel requerida por ciclo, normalmente es 5nC
- $V_{cc}$ = voltaje de alimentación
- $V_f$  = caída de voltaje del diodo BOOTSTRAP
- $f$ = frecuencia se operación
- $V_{LS}$ = Caída de tensión a través del MOSFET en las compuertas emisor colector de la parte de baja en estado encendido

Para utilizar la ecuación anterior, trabajaremos con un diodo 1N4148 para el diodo de bootstrap y los MOSFETs seleccionados son los STP80NF70, se despreciará  $I_{cbs(leak)}$ , ya que el condensador de arranque que se selecciona para esta aplicación es un tipo no electrolítico, este capacitor tiene una corriente de fuga muy pequeña.

Los valores de operación son:

- $Q_g = 75\text{nC}$
- $I_{qbs(max)} = 125\mu\text{A}$
- $V_{cc} = 12\text{v}$

- $Q_{Is}=5nC$
- $V_{LS}= 10v$
- $V_f =1v$
- $f=20kHz$

El valor del capacitor de bootstrap es:

$$C \geq \frac{2[2(75nC) + \frac{125\mu A}{20kHz} + 50nC]}{12v - 1v - 10v}$$

$$C \geq 322,5nF$$

El valor comercial del capacitor bootstrap puede ser:

$$C = 0,47\mu F/50v$$

El diseño final del driver se muestra en la figura 5.13

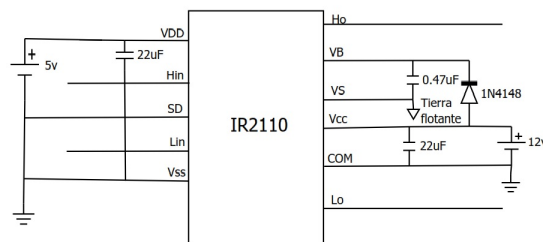


Figura 5.13: Driver IR2110

La figura 5.14 muestra el sistema de una rama para el sistema de driver e inversor trifásico.

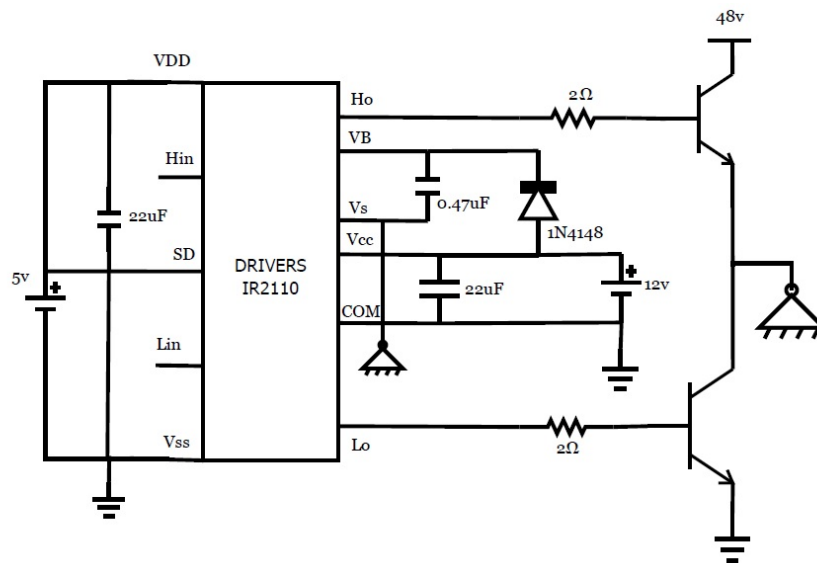


Figura 5.14: Diseño final de una rama para el inversor trifasico

## 5.6. FUENTE DE ALIMENTACIÓN

Dentro de todo este proceso de los vehículos eléctricos es necesario que tenga una fuente de alimentación tanto para el vehículo así como para el controlador, de alguna manera los sensores de efecto Hall, el controlador, los drivers, los pedales ya sea para automóvil o bicicleta eléctrica y demás componentes electrónicos que conforman los vehículos eléctricos es necesario tener una fuente de 5v, para algunos microcontroladores funcionan con este voltaje de 5v, como en el caso del dsPIC30F4011 que se alimenta con una fuente de voltaje de 5v. Y para la alimentación del motor se requerirá tener fuentes de 36v a 48v para el amplio funcionamiento del motor brushless.

Para mantener el banco de baterías cargado, se necesitara contar con un convertidor de *CA/CC*, con características de 50v/2A.

### 5.6.1. CONVERTIDOR CA/CD

Para el uso de la batería, es necesario mantenerla cargada para el uso óptimo de los componentes, así que se diseñara una fuente de voltaje exclusiva para la batería, la energía será tomada de un suministro eléctrico.

La energía que proviene de estos suministros eléctricos como pueden ser enchufes o contactos, estos son de corriente alterna (CA), así que se ocupara de un convertidor de CA/CD.

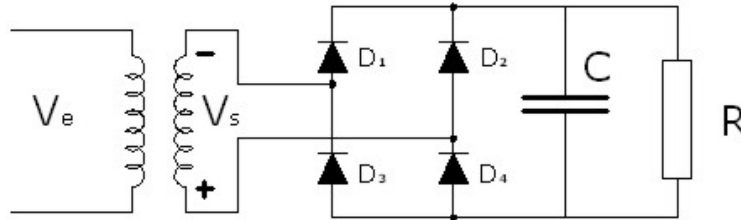


Figura 5.15: Convertidor de CA a CD

El diseño de la fuente de voltaje o convertidor de CA/CC que se muestra en la figura 5.15, será un diseño de lo más básico. Tenemos un valor pico de la señal  $V_p = 123\sqrt{2} = 174[vp]$ . Para el caso del transformador trabajaremos con el 80% de eficiencia, por lo que tenemos un transformador de bajada, con rangos de  $120v_{AC}$  a  $50v_{AC}$  con una corriente de  $2A$ , para alimentar el banco de baterías de  $48v$ . Si ocupamos solo el 80% de esta potencia de los transformadores, para el transformador de  $50v_{AC}$  es de  $80w$  y la corriente máxima que requerimos es de  $I = \frac{P}{V} = \frac{80}{50} = 1,6A$  siendo esta las corriente máxima que nuestro transformador podrá suministrar a nuestro banco de baterías.

Para la rectificación de onda completa ocuparemos 4 diodos de potencia, son diodos comerciales con caída de voltaje de  $0,7v$  y una corriente de  $3A$ , se conectan como se muestra en la figura 5.16.

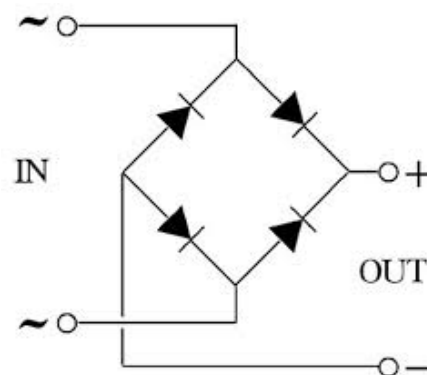


Figura 5.16: Puente rectificador con diodos

Con un capacitor en especial un capacitor electrolítico, es el encargado de filtrar el voltaje constante, como ya sabemos una de las características de los capacitores

es almacenar energía, esto hace que sean indispensables en el diseño de fuentes de voltaje. Existe un efecto que hace que la tensión del capacitor disminuya, este efecto es ocasionado cuando se le agrega una carga, a esta caída de voltaje se le llama voltaje rizado  $V_r$ .

El cálculo del capacitor es de la siguiente manera:

$$C = \frac{I_c}{2\pi f V_r}$$

Donde  $I_C$  es la corriente de consumo máximo del banco de baterías, tenemos que  $I_C = 1,6A$ , por lo general el voltaje rizado se toma como  $V_r = 1,2$ , por lo tanto el capacitor tiene de capacitancia:

$$C = 3536,677\mu F$$

Un valor más comercial a este capacitor es:

$$C = 4700\mu F/80v$$

Nuestro esquema quedaría de la siguiente como se muestra en la figura 5.17.

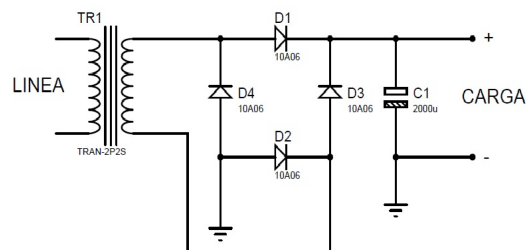


Figura 5.17: Fuente de alimentacion

### 5.6.2. BATERÍAS

El voltaje que se maneja, será de  $48v$ . Ya que con los  $48v$  alimentaremos la parte del motor y con una línea de dos baterías conectadas en serie, alimentaremos con  $24v$  a toda la circuitería que tenemos en el sistema como el controlador, los drivers así como los sensores de efecto hall.

Para la alimentación de  $48v$  utilizaremos 4 baterías de  $12v$  conectadas en serie para obtener los  $48v$ , se empleara la batería *VISION* como se muestra en la figura 5.18.



Figura 5.18: Bateria Vision

### 5.6.3. FUENTES DE ALIMENTACIÓN DE $5v$ y $12v$

Para la obtención de los  $5v$  y  $12v$  usaremos el voltaje que nos proporciona lo de dos baterías que son  $24v$ , tenemos dos casos para la obtención de estos voltajes, se esta usando un regulador de voltaje o también se puede utilizar un regulador de voltaje de bajada.

Los componentes  $78XX$  es la dominación más popular para la regulación de voltajes positivos y los  $79XX$  es para los voltajes negativos, así como para su operación con diferentes corrientes, tenemos el siguiente cuadro 5.4.

CODIGO	Amperaje $max[A]$
78XX	1
78LXX	0.1
78MXX	0.5
78TXX	3
78HXX	5
78PXX	10

Cuadro 5.4: Dispositivos reguladores de voltaje

La figura 5.19 se muestra la configuración ideal para trabajar con los LM7805, para la obtención de 5v.

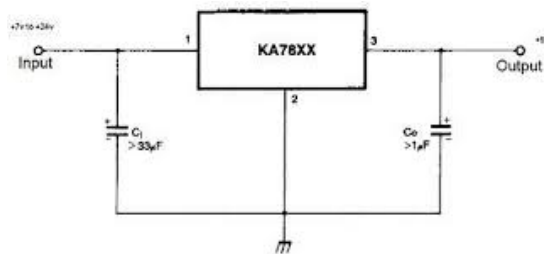


Figura 5.19: Regulador de 5v

La figura 5.20 se muestra la configuración ideal para trabajar con los LM7812, para la obtención de 12v.

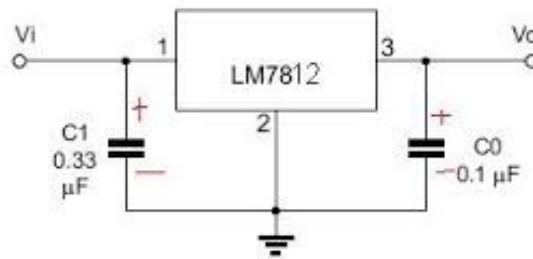


Figura 5.20: Regulador de 12v

Para nuestro caso, lo ideal sera trabajar con un regulador de voltaje de ajustable de bajada LM2596 DC-DC, uno para la fuente de 12v y otro para la fuente de 5v, estas fuentes tienen las características siguientes:

- Entrada de voltaje de 3.2v a 40v
- Voltaje de salida 1.5v a 35v (ajustable)
- Corriente de salida de 3A (max)

## 5.7. MONTAJE DE LOS CIRCUITOS

El control del motor brushless así como el cargador de baterías, fueron diseñados en la plataforma proteus, un software conocido y de fácil manejo para el diseño de circuitos impresos.

### 5.7.1. CARGADOR DE BATERÍAS

El diseño del cargador de baterías para 48v que alimentara el puente trifásico, se diseño como se muestra en la figura 5.21 y en la figura 5.22 es el diseño para el circuito impreso.

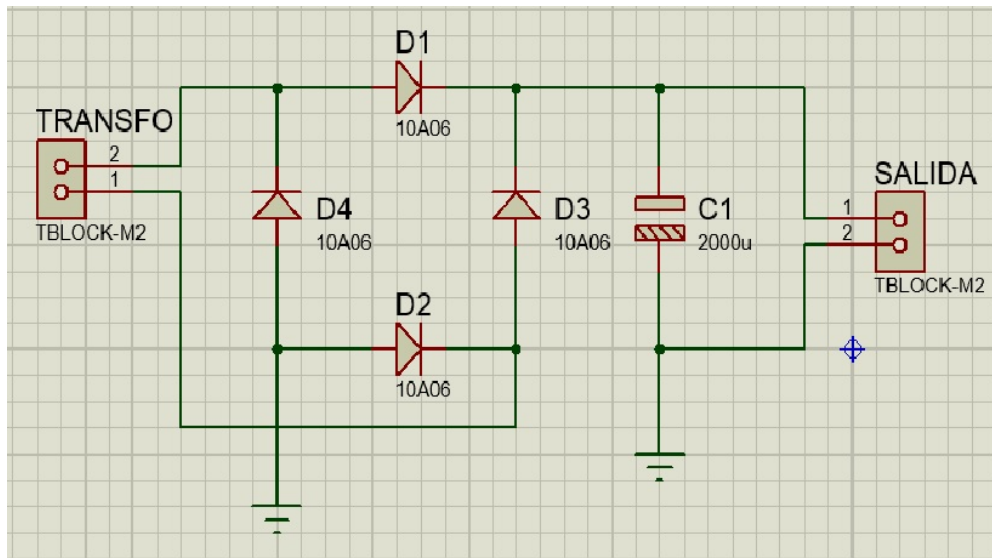


Figura 5.21: Diseño del caragador de baterias

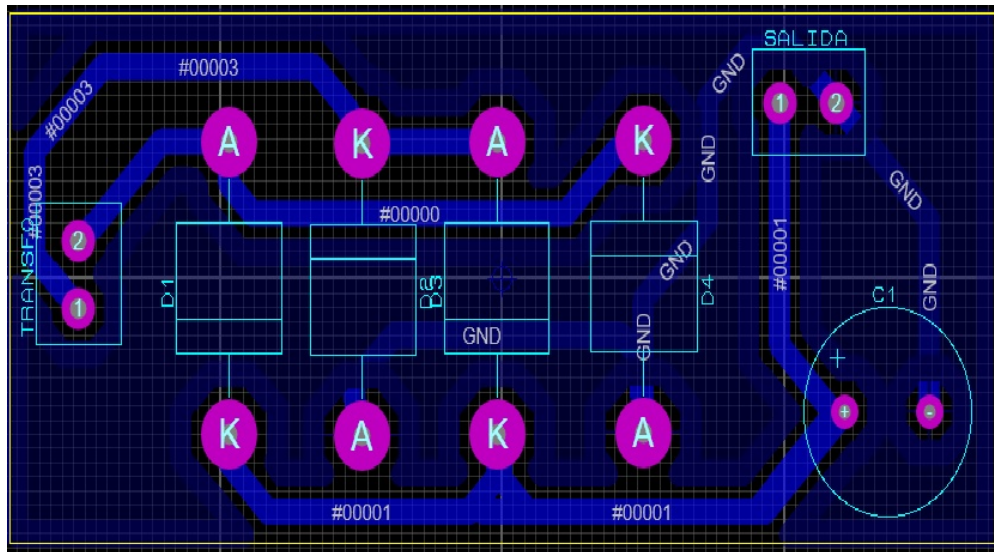


Figura 5.22: Diseño del circuito impreso

### 5.7.2. CONTROL PARA MOTOR BRUSHLESS

El montaje para el controlador del motor brushless, se basó en dos partes, la primera incluye al microcontrolador con los drivers utilizados, esto se puede mostrar en la figura 5.23 y su diseño para circuito impreso se puede apreciar en la figura 5.24 . La segunda contiene al puente trifásico, su diseño es como se muestra en la figura 5.25 y si diseño para el circuito impreso es la figura 5.26.

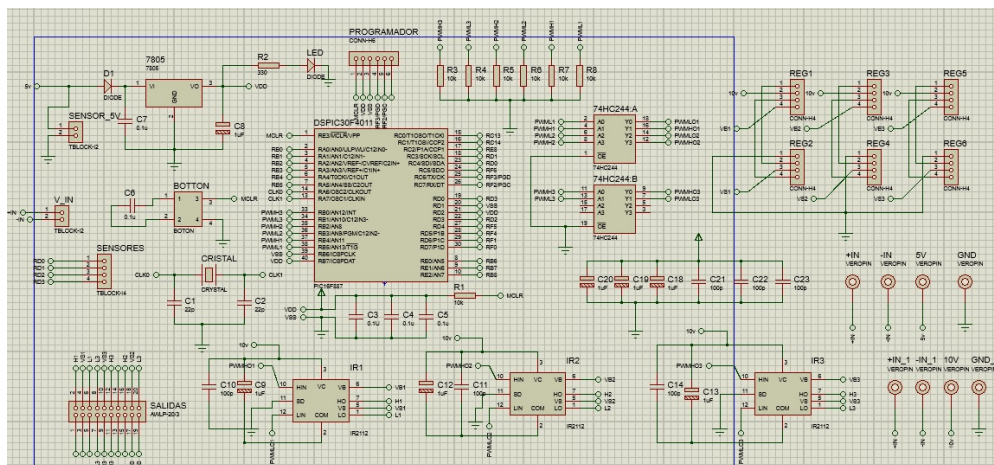


Figura 5.23: Diseño del controlador

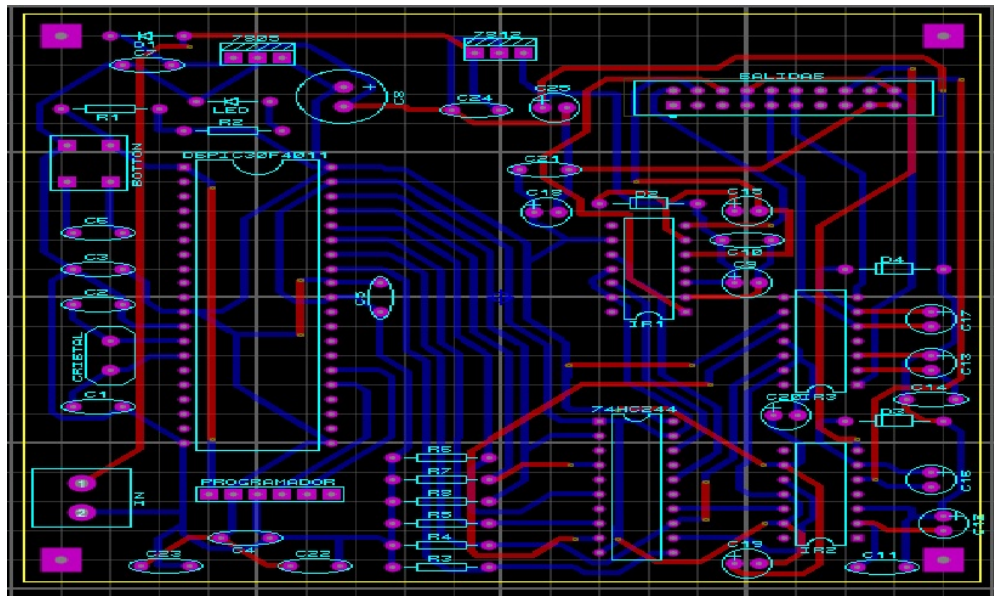


Figura 5.24: Diseño para el circuito impreso

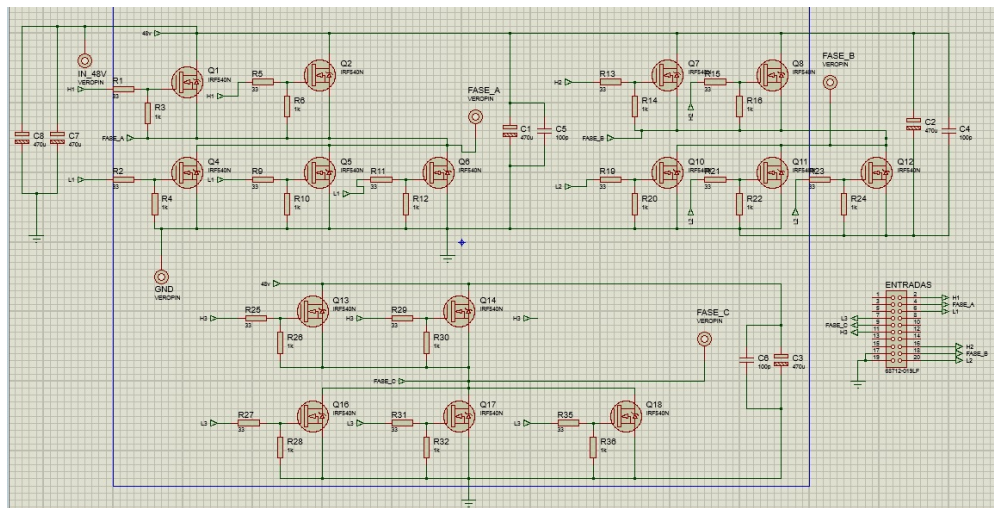


Figura 5.25: Diseño del puente trifásico

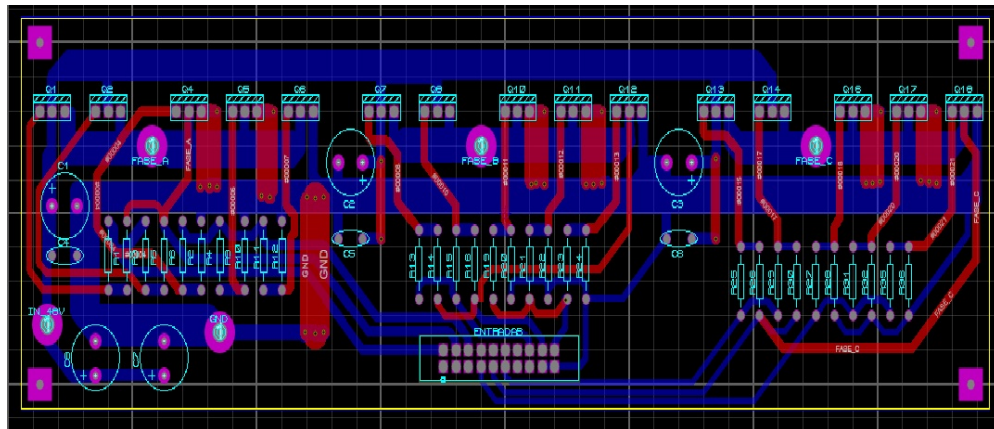


Figura 5.26: Diseño del puente trifasico para circuito impreso

# Capítulo 6

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se realizan pruebas para observar las señales PWM del microcontrolador, las señales de efecto HALL. Se aplica una carga resistiva para observar el comportamiento de las señales. También observaremos las señales que provienen entre fase y fase de un motor brushless que es controlado por voltaje. El estudio de las características del motor brushless hace que tengamos una idea más amplia sobre su funcionamiento, esto hace que trabajemos de una forma real sobre el motor o cualquier otro componente.

### 6.1. SEÑALES DEL MICROCONTROLADOR

Las señales observadas en las figuras 6.1, 6.2, 6.3 , pertenecen a la salida del sistema de control que genera el microcontrolador. Como se había mencionado anteriormente las señales se encuentran desfasadas  $120^\circ$ . Estas señales se conectan con los drivers y luego al puente trifásico donde se tiene que PWML1, PWML2 y PWML3 que se conectan a la parte baja del puente trifásico y en la parte superior se conectan PWMH1, PWMH2 y PWMH3.

La figura 6.1 se observa las salidas que tiene el microcontrolador para la fase A y B del motor brushless, estas salidas son PWMH1 de color azul y PWML2 de color amarillo.

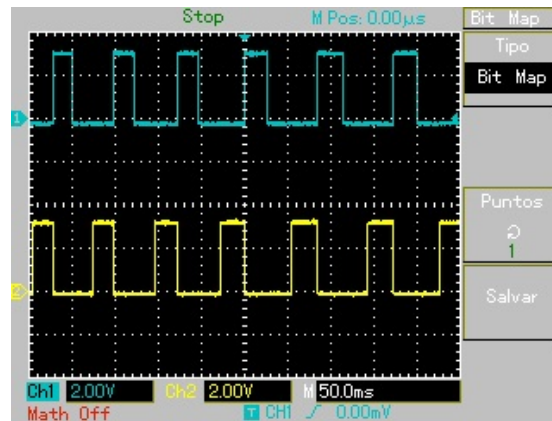


Figura 6.1: Salida del microcontrolador para la fase A y B

Se observa en la figura 6.2 las salidas del microcontrolador PWMH2 de color azul y PWML3 de color amarillo, estas activan la fase A y C del motor BLDC.

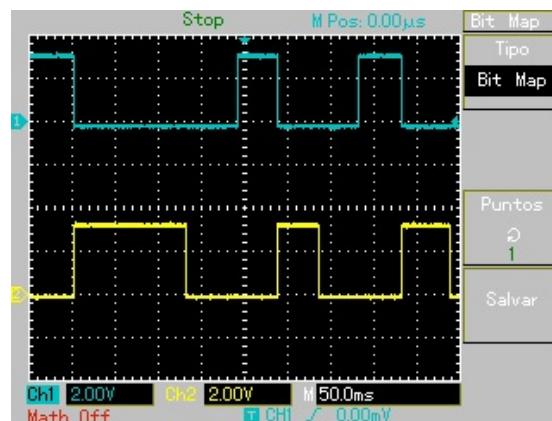


Figura 6.2: Salida del microcontrolador para la fase A y C

Las fases B y C son activadas cuando en el microcontrolador enciende PWMH3 de color amarillo y PWML2 de color azul, como se muestra en la figura 6.3

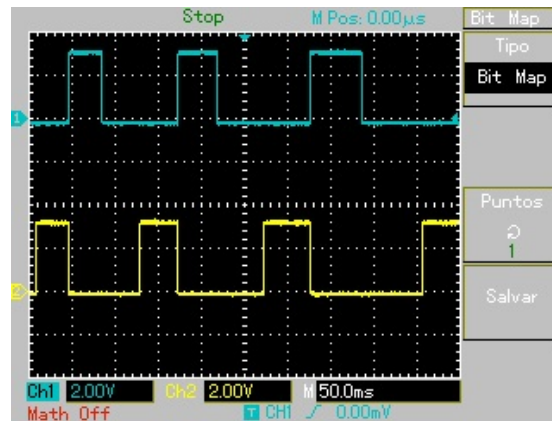


Figura 6.3: Salida del microcontrolador para la fase B y C

## 6.2. SEÑALES DE LOS SENSORES HALL

Las señales que tenemos a continuación en las figuras 6.4, 6.5 y 6.6 son las que señales que salen de los sensores de efecto Hall. Estas señales se encuentran desfasadas  $120^\circ$ .

Las señales que se observan en la figura 6.4, son las señales que provienen de los sensores HALL A de color amarillo y B de color azul.

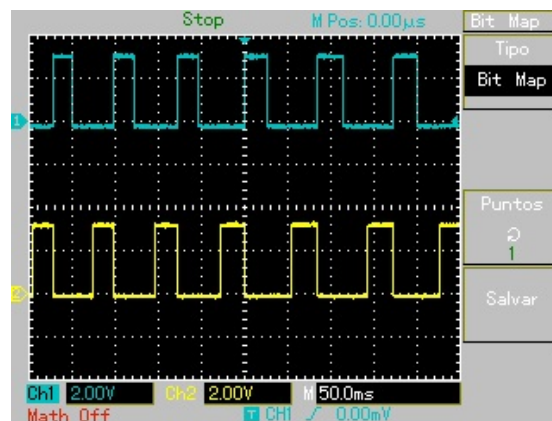


Figura 6.4: Señales de los sensores Hall del motor entre sensores A y B

En la figura 6.5, se observa las señales del sensor A de color azul y del sensor C de color amarillo .

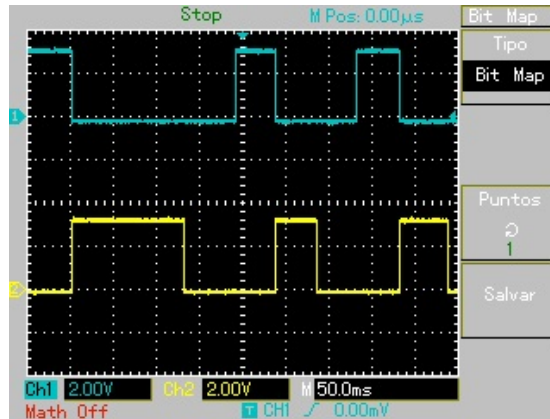


Figura 6.5: Señales de los sensores Hall del motor entre sensores A y C

Las señales que se observan en la figura 6.6, son de los sensores de efecto HALL B de color azul y C de color amarillo.

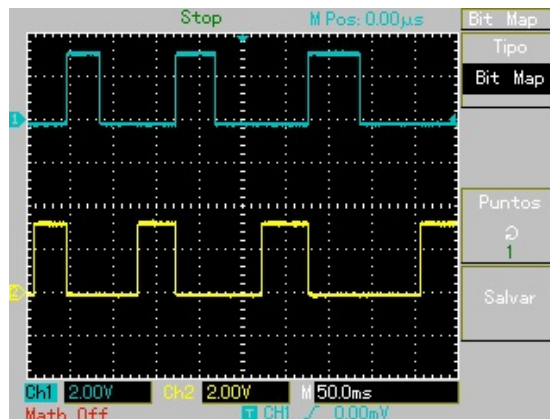


Figura 6.6: Señales de los sensores Hall del motor entre sensores B y C

### 6.3. SEÑALES CON CARGA RESISTIVA

Con resistencias conectadas en estrella como se muestra en la figura 6.7, logramos ver las señales que se muestran en las siguientes figuras, se escogió la configuración en estrella ya que podemos tener un neutro y así trabajar más sencillo con el osciloscopio.

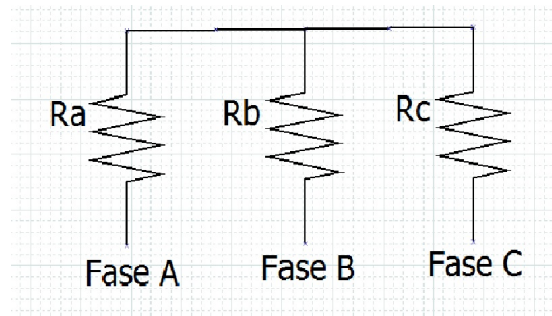


Figura 6.7: Conexión estrella de una carga resistiva

Para el caso de la figura 6.8, se observa la fase A de color azul y la fase B de color amarillo, como una señal que está en alta y otra señal que se encuentra en baja.

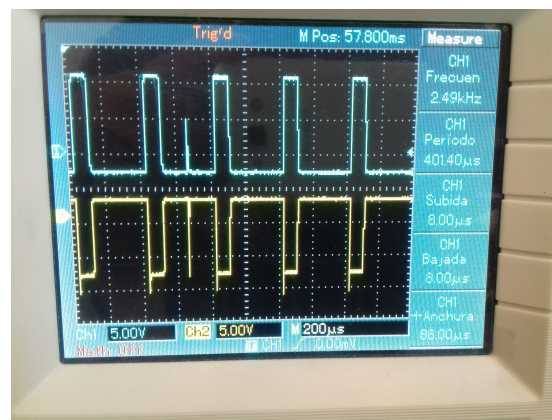


Figura 6.8: Fase A y Fase B

La figura 6.9 muestra como esta activada la fase A de color azul y la fase C de color amarillo se encuentra desactivada.

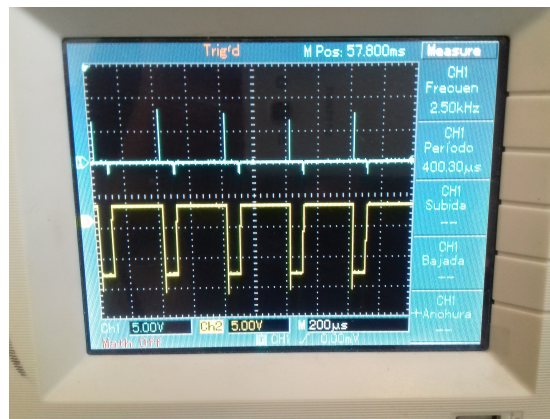


Figura 6.9: Fase B y Fase C

En la figura 6.10 se aprecia que la fase B de color azul esta activada negativamente y la fase C de color amarillo esta desactivada.

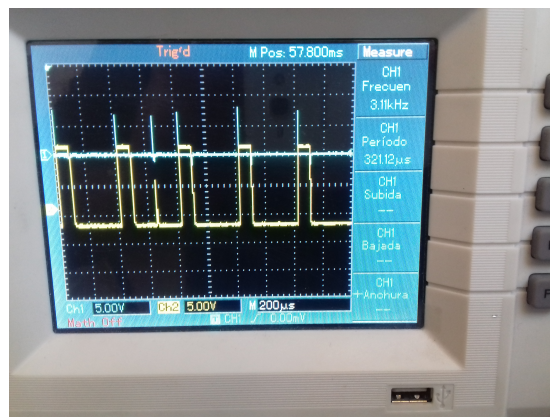


Figura 6.10: Fase A y Fase C

La figura 6.11 muestra las tres señales de accionamiento del motor, mostrando una idea más general de lo que se está hablando anteriormente. El control que se aplica al sistema es trapezoidal, no se logra ver muy bien en la figura, pero se nota como se activa la fase A de color amarillo, la fase B de color azul y la fase C de color morado, esto es suficiente para que el motor gire.

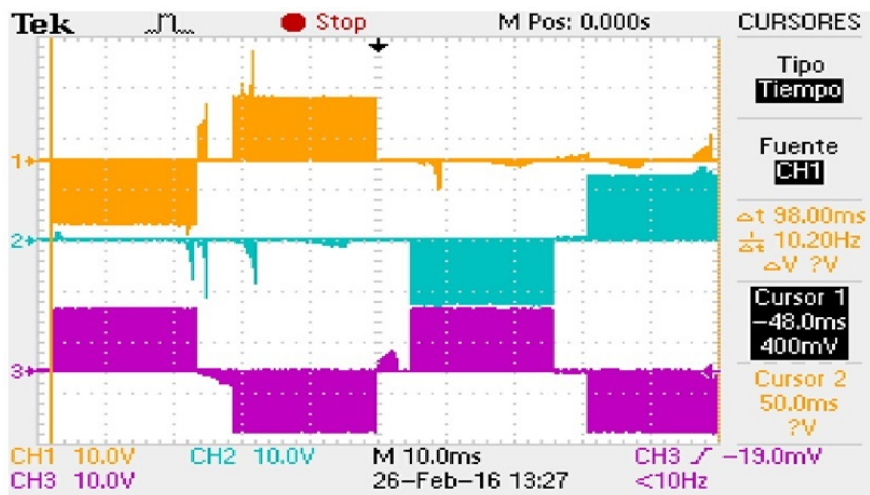


Figura 6.11: Señales de accionamiento de las fases A, B y C

Se puede hacer una comparación entre las salidas de las fases de la figura 6.11 y la figura 6.12, se puede apreciar que las salidas son prácticamente lo mismo con respecto a la secuencia que sigue el motor, a consecuencia de los sensores de efecto HALL.

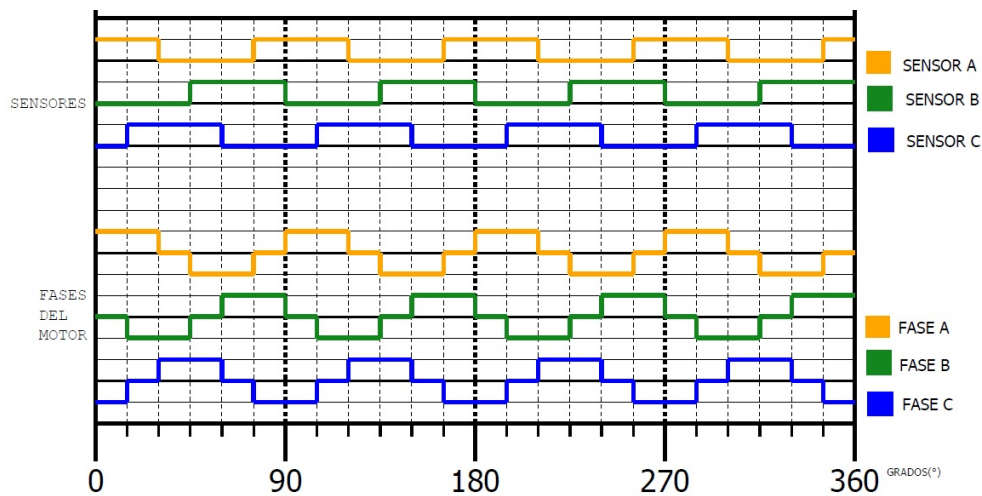


Figura 6.12: Activación de las fases con respecto a los sensores

## 6.4. PRUEBAS DE DESEMPEÑO AL VEHÍCULO ELÉCTRICO

Mediante pruebas físicas se puede encontrar los parámetros que proporciona el fabricante del motor eléctrico y el fabricante de las baterías recargables y a partir de aquí uno como fabricante del vehículo eléctrico podemos dar nuevos parámetros de desempeño para este vehículo. Entre las pruebas de desempeño que se le realizaron al vehículo eléctrico se encuentra el tiempo de descarga de las baterías, la velocidad del vehículo con diferentes cargas, la potencia del vehículo y el trabajo que realiza este.

### 6.4.1. GRÁFICAS DE VELOCIDAD DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO

La figura 6.13 muestra la máxima velocidad que tiene el vehículo eléctrico en un intervalo de  $10m$  logrando alcanzar esta distancia en  $26s$ , también se puede apreciar en el cuadro 6.1, con un peso de una persona de  $90kg$ , estamos hablando que el vehículo lleva una velocidad máxima de una velocidad de  $1,38Km/h$ .

DISTANCIA [m]	TIEMPO[s]	VELOCIDAD	
		[m/s]	[Km/h]
1	2	0.5	1.8
2	4	0.5	1.8
3	7	0.49	1.76
4	10	0.49	1.76
5	13	0.38	1.36
6	15	0.37	1.33
7	18	0.38	1.36
8	21	0.38	1.36
9	24	0.37	1.33
10	26	0.38	1.36

Cuadro 6.1: Tabla de Distancia y Tiempo

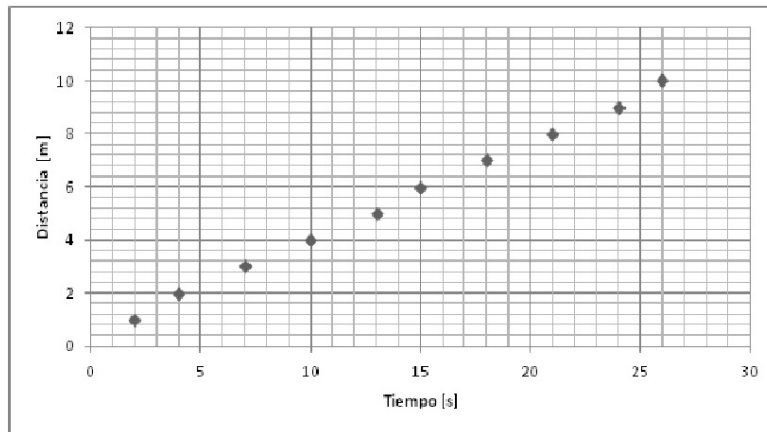


Figura 6.13: Grafica de distancia contra tiempo

En la figura 6.13 muestra el tiempo que tarda en llegar de una distancia a otra, con la tabla 1, se alcanza apreciar a qué velocidad pasa por cada punto marcado en la gráfica. Mostrando lo que se dijo anteriormente como llega el vehículo de 0m a 10m en 26s.

#### 6.4.2. TIEMPO DE DESCARGA DE LAS BATERÍAS

En la figura 6.14 muestra una gráfica del tiempo de descarga del banco de baterías, mostrando entre que niveles de carga trabaja el motor brushless, también se puede apreciar en el cuadro 6.2.

TIEMPO [hrs]	DESCARGA [v]
0	48
1	45
2	42
3	39
4	36
5	33
6	30
7	27
8	24
9	21
10	18
11	15
12	12
13	9

Cuadro 6.2: Tabla de Tiempo y Descarga

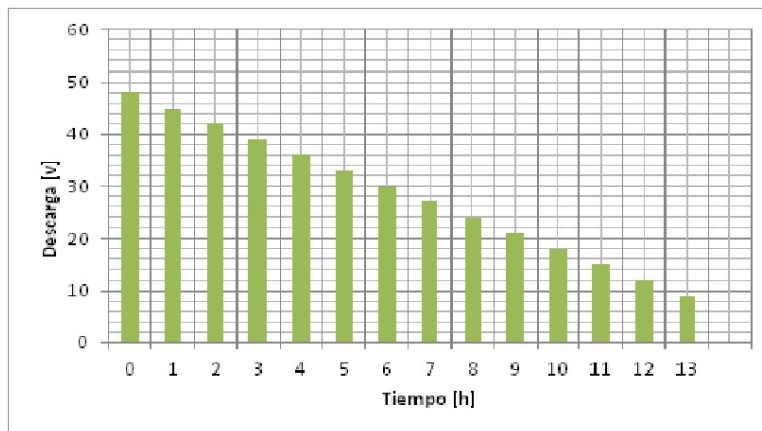


Figura 6.14: Grafica de Tiempo contra Descarga

La figura 6.14 muestra el tiempo en que se descargó el banco de baterías a lo largo de un periodo de 13 horas de trabajo del vehículo. Llegando a un valor de 9v como mínimo, ya que en este valor el motor ya no reacciona como debería ser. Y por lo anterior, las baterías solo llegan a un 20 % de descarga. Estas llegan a su límite de descarga.

### 6.4.3. TRABAJO REALIZADO POR EL VEHÍCULO ELÉCTRICO

Los principales datos del motor son: 46 polos, la tensión nominal es de  $48v$ , potencia nominal es de  $1000w$  para una velocidad nominal  $420rpm$ , el radio exterior del neumático es  $0,32m$  lo que resulta que puede llegar a tener una velocidad de de  $50Km/h$ .

Los parámetros de medición del motor han empezado con encontrar la constante del motor llamada  $k$ , mediante un valor de cresta  $E$  de la  $FEM$ , con el motor girando a una velocidad constante  $\Omega$ .

Donde:

$$k = \frac{E}{\Omega}$$

Suponiendo que el motor gira a su máxima velocidad con una persona de  $69kg$ , este puede recorrer  $21m$  en  $11,43s$ , estamos hablando de una velocidad de:

$$v = 1,837m/s$$

Lo que equivale a ir a:

$$v = 6,613km/h$$

Para una persona con un peso de  $110kg$ , el vehículo recorre  $21m$  en  $17,50s$ , la velocidad es de:

$$v = 1,2m/s$$

Lo que equivale a:

$$v = 4,32km/h$$

Las especificaciones del fabricante consideran que, con una persona de  $85kg$  se puede llegar a la velocidad de  $45Km/h$ .

Haciendo la conversión de  $m/s$  a  $rad/s$  para ambas velocidades y tenemos que el radio de la llanta  $r = 0,282m$ , esto equivaldría que la velocidad es:

$$v = \omega r$$

$$\omega_{69} = 6,489rad/s$$

$$\omega_{110} = 4,255rad/s$$



Figura 6.15: FEM a 61.965 rpm

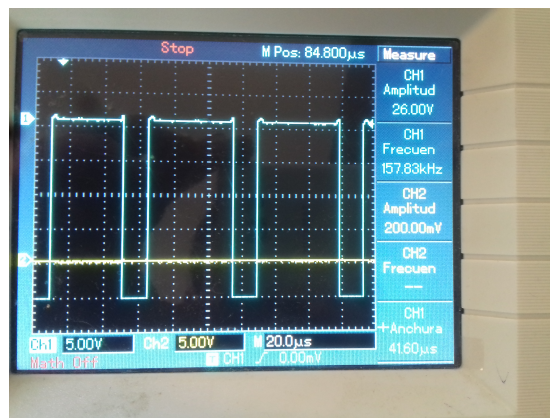


Figura 6.16: FEM a 40.632 rpm

Observando las figuras 6.15 y 6.16, se puede deducir que el factor  $E_{69}$  es de 26,14 y para el factor  $E_{110}$  tiene un valor de 26,00. Por lo que la constante  $k$  tiene un valor de:

$$k_{69} = 4,03Vs/rad$$

$$k_{110} = 6,110Vs/rad$$

Con estos valores encontrados, calculamos el torque  $\tau$  del motor

$$\tau \cong \frac{I_{dc,max} V_b}{\Omega}$$

Donde  $I_{dc,max}$  es la corriente máxima que consume el motor que vendría siendo 20,833A y  $V_b$  es la tensión nominal. Por lo que tenemos que el motor aplica una fuerza de:

$$\tau_{69} = 154,104Nm$$

$$\tau_{110} = 235,013Nm$$

#### 6.4.4. POTENCIA DE CONDUCCIÓN DEL VEHÍCULO

La potencia  $P_{total}$  necesaria para la conducción del vehículo esta dado por la suma de la potencia  $P_{drag}$  que es la potencia necesaria para superar la resistencia del aire, mas la  $P_{hill}$  que es la potencia necesaria para superar la resistencia del aire, más la  $P_{friccion}$  que es la potencia para superar la fricción, estas fuerzas se muestran en la figura 6.17. Las siguientes ecuaciones se explican en [Muetze and Tan, 2007], donde los símbolos de los parámetros sus unidades y algunas observaciones se muestran en el cuadro 6.3.

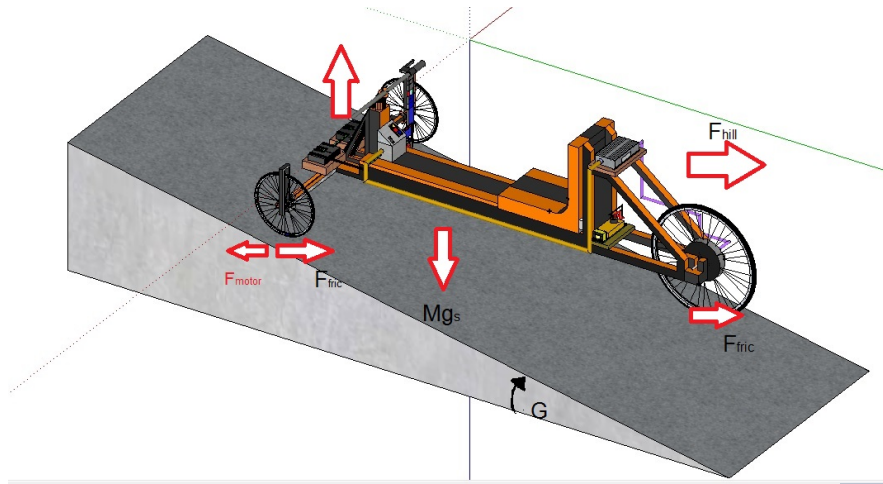


Figura 6.17: Fuerzas que actúan en un vehículo eléctrico

Cuando el vehículo eléctrico sube o baja una pendiente, su peso produce una fuerza que se opone al movimiento cuando este va a hacia adelante durante el ascenso, o bien, ayuda al movimiento de avance cuando el vehículo eléctrico desciende. Por lo tanto, la energía que se consume:

$$P_{hill} = 9,81 \times M \times G \times V_g$$

La fuerza de arrastre aerodinámico está dada por:

$$F_w = \frac{C_d \times D \times A \times (V_r)^2}{2} \quad (6.1)$$

Donde:

$V_r$  es la velocidad relativa del vehículo, se puede expresar como  $V_r = V_g + V_w$

La potencia consumida en la superación de la resistencia del viento en cada incremento de desplazamiento está dada por:

$$P_w = F_w \times V_g \quad (6.2)$$

Sustituyendo 6.1 en 6.2 tenemos:

$$P_w = V_g \frac{C_d \times D \times A \times (V_g + V_w)^2}{2}$$

La resistencia de los neumáticos en superficie dura se le conoce como resistencia de rodadura, esta resistencia puede variar según sea la superficie por donde el vehículo rueda. La resistencia de rodadura está dada por:

$$P_{total} = 9,81 \times M \times R_c \times V_g$$

Por lo que se tiene la potencia total que es exigida por el vehículo eléctrico es:

$$P_{total} = P_{drag} + P_{hill} + P_{friccion}$$

Donde:

$$P_w = P_{friccion} = 9,81 \times m \times R_c \times V_g$$

$$P_{hill} = 9,81 \times G \times m \times V_g$$

$$P_r = P_{drag} = (V_g + V_w)^2 \frac{C_d \times A \times D \times V_g}{2}$$

SÍMBOLO	PARÁMETROS	UNIDAD	OBSERVACIONES
$C_d$	Drag Coefficient	-	Este coeficiente es pequeño, el valor típico para los ciclistas es $C_d = 0,5$
D	Densidad del aire	$\frac{km}{m^3}$	La densidad del aire es: $D = 1,09$ a $50^\circ C$
A	Área frontal	$m^3$	El área frontal, es el área de la masa encontrada por el aire. Los valores típicos son: $D = 0,4m^2$
$V_g$	Velocidad del vehículo	$\frac{m}{s}$	-
$V_w$	Velocidad del aire	$\frac{m}{s}$	Como las pruebas no se presentaban corrientes de aire fuertes podemos de que en ese tiempo la velocidad es de 0
G	Grado de la pendiente	-	El grado de la pendiente G debe ser expresado por $\arctan(\text{rise/run})$ . Por ejemplo las pruebas fueron hechas en una superficie de 21m y una altura de 0.05m, el grado de pendiente es $0,136^\circ$
m	peso de la persona	kg	-
$R_c$	coeficiente de balanceo	-	El coeficiente de balanceo depende de la fricción. Por ejemplo, grava comprimida y caminos suaves de asfalto tienen diferentes coeficiente, estos pueden ser de 0.004 y 0.014, respectivamente.
9.81	Aceleración gravitacional	$\frac{m}{s^2}$	-

Cuadro 6.3: Símbolos, definiciones y parámetros

Con las ecuaciones anteriores, se realizó en el cuadro 6.4, donde muestra la potencia que ejerce el vehículo para los dos conductores.

	Conductor 1	Conductor 2
peso [kg]	69	110
$P_{total}$	658.127	661.416
$V_g$ [km/h]	6.613	1.2
Tiempo [s]	11.43	17.50
Distancia [m]	21	21

Cuadro 6.4: Resultados del análisis de conducción

## 6.5. COSTOS DEL PROYECTO

Para hacer un diseño de bajo costo para los usuarios, es necesario buscar componentes económicos y eficientes, ya que una de las principales características u objetivos de los fabricantes son los costos, ya que teniendo un presupuesto bajo se pueda realizar el diseño, la construcción, así como el controlador y el banco de baterías para nuestro vehículo eléctrico.

Los gastos que se realizaron para el vehículo eléctrico es el siguiente:

COMPONENTE	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO [\$]
Cuadro	Cuadro de metal	1	1,000
Baterías	Ion-Litio a 12v/12Ah	4	2,440
Motor con llanta	Motor brushless de 1000w	1	4,000
LLantas	LLantas delanteras	2	100
Freno electromecanico	Freno de puño con botón electrónico	1	200
Acelerador electrónico	Incrementar la velocidad por medio de un potenciómetro	1	200
Controlador	Contiene el microcontrolador, drivers para MOSFETs y puente trifásico, con sus adaptadores	1	1,950
Panel de control	Botones pulsadores para indicar que el vehículo esta encendido, para avanzar o retroceder	1	50
Cableado	Cableado de alta corriente	4m	100
	Cableado de baja corriente	100m	200
Cargador de baterías de 12v	cargador para baterías de 12v	1	100
Cargador de baterías de 48v	Cargador para un banco de baterías con 48v	1	150
TOTAL			10,490

Cuadro 6.5: Gastos de componentes

# Capítulo 7

## CONCLUSIONES

El objetivo del diseño y construcción del vehículo eléctrico, es mejorar el medio ambiente que se vive actualmente en la Ciudad de México y la economía de los ciudadanos ya que elimina los gastos que representa un vehículo de combustión interna, éste puede recorrer relativamente largas distancias eliminando el esfuerzo físico que se realiza con otro tipo de vehículos similares como la bicicleta. Con él se puede mejorar la movilidad de las personas en las calles de la ciudad, ya que como se ha mencionado, el transporte público es insuficiente en horas pico.

En la actualidad, podemos encontrar vehículos eléctricos con motores de corriente directa, pero desde hace algunos años se ha marcado una tendencia en el uso de motores brushless. La adaptación de un solo motor en la llanta trasera permite obtener un vehículo mecánicamente estable con sólo tres ruedas, obteniendo al mismo tiempo un vehículo 100% eléctrico de bajo costo que puede ser recargado tanto en el hogar como en centros comerciales que cuentan con conexiones especiales para este tipo de vehículos.

La estructura metálica que se fabricó es sólida y ligera, esta puede sostener a los elementos que lo conforman como los neumáticos delanteros, el neumático con motor de la parte trasera, controlador, baterías, etc. El vehículo obtenido es firme, estable y fácil de maniobrar, el diseño del vehículo se realizó en un programa de diseño gráfico y modelado en tres dimensiones (3D), el estudio de las baterías nos llevó a la selección de baterías selladas para fines prácticos, aunque sean pesadas y grandes son muy eficientes, existen baterías menos pesadas y más eficientes pero sus costos son muy elevados.

Como se ha mencionado, se utilizó un motor brushless en el vehículo, haciendo un estudio del control y operación de éste. El motor se desarmo para hacer un

análisis y familiarizarnos con los componentes de éste, reconociendo los sensores de efecto hall, bobinas, imanes y contar el número de polos que tiene el motor, incluso se realizó un cambio de sensores Hall, porque uno de estos estaba dañado. El análisis de los datos del fabricante, nos dio pauta para conocer los alcances que tiene el motor en operación.

Se logró diseñar un controlador para motores brushless basado en un dsPIC. Se estudió y se analizó al motor brushless posicionándolo en diferentes ángulos y haciendo una lectura de la posición de los sensores, esto para saber el sentido de giro del motor.

El estudio y descripción de la operación de un inversor trifásico fue útil para el diseño de un sistema propio mediante el uso de Mosfets activados por el software de control que se ejecuta en el microcontrolador. Los componentes antes mencionados ocupan diferentes niveles de energía, así que se diseñó un cargador de baterías (convertidor AC/DC) para 48v y dos fuentes de DC una de 5v y otra de 12v. Todos estos diseños se desarrollaron para fines prácticos en una sola tarjeta junto con el controlador y drivers y otra para el puente trifásico. La experimentación de los drivers con controlador se efectuó generando señales y observando su comportamiento en un osciloscopio. El puente trifásico presentó algunas fallas ya que las pistas no soportaban la corriente que necesita la carga; para eliminar este problema se reforzaron las pistas.

Las pruebas realizadas fueron hechas con éxito, logrando ver el comportamiento de los sensores y del microcontrolador con una carga resistiva y analizando el comportamiento del motor, se llegó a que el funcionamiento fue adecuado para el tipo de control que se diseñó, así mismo se estudió la eficiencia del motor y del vehículo, encontrando la potencia, el trabajo que realiza cuando se presenta una pendiente, estos datos obtenidos fueron hechos con diferentes sujetos.

## 7.1. RESULTADOS DEL PROYECTO

La iniciativa de tener una bicicleta eléctrica dio paso a la realización del triciclo eléctrico invertido, esto hizo que al principio del proyecto se hayan propuesto una serie de objetivos que se cumplieron satisfactoriamente. Se obtuvo un código sencillo de control de velocidad para el motor brushless, el controlador fue programado satisfactoriamente para que este sea capaz de leer los sensores hall obteniendo así la posición del rotor, teniendo en cuenta que también puede leer tres botones pulsadores una para indicar si va de frente, el otro para indicar si el vehículo va de reversa y un tercero para indicar el encendido del vehículo. Se

agregó un control de velocidad en la parte del puño del vehículo, así como un freno electromecánico, este control permite que se acelere o desacelere al motor.

La electrónica que se aplicó durante el proyecto, fue la electrónica básica que se aprendió y se desarrolló durante la carrera de ISEI, realizando diseños y construcción de circuitos impresos.

La construcción de la estructura del vehículo, fue un poco compleja, ya que es de fierro y el manufacturar estos perfiles metálicos requiere equipo costoso y, su manejo y conocimiento no es del área del diseño electrónico. Se obtuvo una estructura resistente y no muy pesada, gracias a que en algunos puntos se le puso madera, para colocar el banco de baterías, el cargador de baterías y el controlador del motor. Se puede cambiar la madera y los fierros pesados por materiales ligeros y de mejor calidad.

El impacto que tiene el peso de una persona es un factor importante, ya que el desempeño del motor depende del peso de la persona, la velocidad disminuye a mayor peso o la velocidad aumenta cuando tenemos a una persona ligera, esto también influye en la carga de las baterías, ya que como sabemos el motor eléctrico exige más corriente cuando tenemos una carga grande o menos corriente cuando tenemos una carga chica. Otro de los factores que influyen en los resultados, se nota cuando tenemos una pendiente, las pruebas que se realizaron al vehículo eléctrico, fueron hechas con una pendiente pequeña, esto quiere decir que si el carro tiene una dirección que apunta hacia la bajada, este puede tener una velocidad mayor o si la dirección del vehículo es hacia la subida de la pendiente, el esfuerzo para subir es mayor, aquí también se le exige las corrientes al banco de baterías.

Como se mencionó durante el proyecto, los automóviles eléctricos tienen una gran ventaja sobre los automóviles de combustión interna, la principal ventaja es el ahorro del combustible y el beneficio que se tiene al medio ambiente.

## 7.2. LIMITACIONES

Muchas de las mediciones que fueron hechas dentro del proyecto, no son tan optimas como se espera, ya que, en el ramo de la industria automotriz, cuentan con los mejores equipos de medición. Es por eso que nos basamos en los informes y especificaciones de datos que da el fabricante del motor BLDC. Podemos decir que el proyecto este limitado ya sea por razones financieras y por los equipos de medición.

### 7.3. TRABAJO A FUTURO

Como se aprecia en los resultados de la velocidad, ésta no es óptima para todos los usuarios, se puede llegar a hacer un buen trabajo a futuro para que nuestro motor vaya a una mayor velocidad, así que el nivel de descarga de las baterías sería mucho más rápido ya que la exigencia sería mayor.

Se puede apreciar que para personas con mayor peso el vehículo le cuesta más trabajo andar que con una persona más ligera, el peso de la persona impacta notablemente su desempeño, quizás se podría mejorar haciendo una estructura mucho más ligera y utilizar unas baterías menos pesadas.

Algunas de las mejoras que se le pueden realizar a este vehículo en un futuro, podría colocarse un GPS, sensores de proximidad para que evitar choques, amortiguamiento del vehículo, un velocímetro, un mejor sistema de dirección, así como los automóviles que tienen indicadores de gasolina este podría tener indicadores de carga del banco de baterías. Hay un sinnúmero de aplicaciones que se le puede realizar a este vehículo.

Otra de sus mejoras que podría realizarse es manejar estructuras menos pesadas como el aluminio y quizás las materias con el que se realizan las bicicletas, ya que con esto el funcionamiento de este motor mejoraría su rendimiento. En algunas tiendas de bicicletas eléctricas ya venden baterías que son especiales para este tipo de motor, haciendo que el banco se reduzca en peso y tamaño, claro está tiene un costo mucho mayor que al banco de baterías que tiene el vehículo eléctrico del proyecto. Una de las cosas que se pueden tomar en cuenta para recargar este banco de baterías, podría ser el uso de celdas solares ya que sería una ayuda para optimizar los recursos de la energía eléctrica. También otras de las cosas tenemos al freno regenerativo, este regresa energía al banco por medio de un pedaleo. Estos son algunos de los recursos que se pueden aplicar al banco de baterías del vehículo eléctrico.

# Bibliografía

- [Acosta, 2011] Acosta, J. ((2011)). Hyfusen. *Recuperado el 14 de Septiembre del 2016 de* [http://www.cab.cnea.gov.ar/ieds/images/2011/hyfusen\\_2011/trabajos/04-002.pdf](http://www.cab.cnea.gov.ar/ieds/images/2011/hyfusen_2011/trabajos/04-002.pdf).
- [AKTUA, 2010] AKTUA ((20 de Marzo del 2010)). *Recuperado el 30 de Noviembre del 2015 de* [http://www.aktuaya.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=464](http://www.aktuaya.org/index.php?option=com_content&view=article&id=464).
- [Andrada et al., 2005] Andrada, P., Torrent, M., Blanqué, B., and Perat, J. (2005). Accionamientos de reluctancia autoconmutados para vehículos eléctricos. *Información tecnológica*, 16(5):79–87.
- [Bertoluzzo et al., 2008] Bertoluzzo, M., Buja, G., and Pavoni, A. (2008). Characterization and improved control of a brushless dc drive with in-wheel motor. In *Power Electronics and Motion Control Conference, 2008. EPE-PEMC 2008. 13th*, pages 1491–1496. IEEE.
- [Bike, 2013] Bike, E. P. ((2013)). *Recuperado el 10 de Septiembre del 2016 de* <https://sites.google.com/site/electricpowerbike/home/projet/moteurs/nine-continent>.
- [Cabrera, 2015] Cabrera, D. ((27 de Septiembre del 2015)). La jornada. *Recuperado el 15 de Noviembre del 2015 de* <http://www.eluniversal.com.mx/articulo/periodismo-de-datos/2015/08/27/mexico-obesidad-sobrepeso-y-diabetes>.
- [Cano, 2014] Cano, V. ((13 de Agosto del 2014)). Auto bild. *Recuperado el 18 de Septiembre del 2016 de* <http://www.autobild.es/pruebas/mitsubishi-outlander-phev-suv-hibrido-enchufable-196064>.
- [Chapman et al., 2012] Chapman, S. J. S. J., Boylestad, R. L. L. B., Hayt, W. H. D., KEMMERLY, S. M., Hayt, J. E. W. H., Kemmerly, J. E., Durbin, S. M., Floyd, T. L., Edminister, J. A. N., Edminister, M. A., et al. (2012). *Máquinas eléctricas*. Number 621.313. Pirelli.

- [CONTRAPESO, 2014] CONTRAPESO ((25 de Noviembre del 2014). Contrapeso. *Recuperado el 28 de Octubre del 2015 de* <http://www.contrapeso.org/el-sobrepeso-y-la-obesidad-en-mexico/>.
- [Cruz, 2013] Cruz, A. ((14 de Agosto del 2013)). La obesidad infantil es el principal problema de salud en la ciudad de Mexico. *Recuperado el 11 de Noviembre del 2015 de* <http://www.jornada.unam.mx/2013/08/14/capital/030n2cap>.
- [Deitel, 1995] Deitel, P. J. (1995). *Cómo programar en C/C++*. Pearson Educación.
- [Dorf et al., 2005] Dorf, R. C. B., Dorf, R. H. R. C., Bishop, R. H., Dorf, R. C. S., Dorf, J. A. R. C., Svoboda, J. A., and Dorf, R. C. (2005). *Sistemas de control moderno*. Pearson Educación,.
- [EcuRed, 2010] EcuRed ((2010)). Ecured. *Recuperado el 14 de Noviembre del 2015 de* [https://www.ecured.cu/index.php/Veh%C3%ADculo\\_el%C3%A9ctrico](https://www.ecured.cu/index.php/Veh%C3%ADculo_el%C3%A9ctrico).
- [Electromaps, 2016] Electromaps ((2016)). Electromaps. *Recuperado el 10 de Octubre del 2016 de* <http://www.electromaps.com/coches-electricos/mercedes-benz/sls-amg-electric-drive>.
- [FIMEVIC, 2010] FIMEVIC ((2010)). Gobierno de la ciudad de Mexico. *Recuperado el 23 de Noviembre del 2015 de* <http://www.fimevic.df.gob.mx/problemas/problemasdemov.htm>.
- [Floyd et al., 1997] Floyd, T. L., Caño, M. J. G., and de Turisi, E. B. L. (1997). *Fundamentos de sistemas digitales*, volume 7. Prentice Hall.
- [Fraile Mora et al., 2005] Fraile Mora, J. J., Fraile Ardanuy, J., and Jesus Fraile Mora, J. F. A. (2005). Problemas de máquinas eléctricas. Technical report, e-libro, Corp.
- [Galeano, 2009] Galeano, G. (2009). *Programación de sistemas embebidos en C*, volume 1. Alfaomega.
- [Garza, 2013] Garza, M. L. ((24 de Octubre del 2013)). Autos eléctricos: Cambio y oportunidad. *Recuperado el 30 de Enero del 2016 de* <http://archivo.eluniversal.com.mx/finanzas-cartera/2013/impreso/autos-electricos-cambio-y-oportunidad-105815.html>.
- [Gil, 2016] Gil, J. ((3 de Junio del 2016)). Hye. *Recuperado el 19 de Septiembre del 2016 de* <http://www.hibridosyelectricos.com/articulo/sector/ventas-vehiculos-hibridos-y-electricos-siguen-disparadas/20160603194650012204.html>.

- [Gottfried et al., 1991] Gottfried, B. S., de Buenaga, M., Manjón, B. F., and Sánchez, A. V. (1991). *Programación en C*, volume 2. McGraw-Hill.
- [GRUDILEC, ] GRUDILEC. Grudilec. *Recuperado el 18 de Noviembre del 2015 de* <http://www.grudilec.com/index.php/es/vehiculoelectrico2/historia-de-vehiculo-electrico>.
- [Guias, 2013] Guias, . A. ((2013)). 100 autos guias. *Recuperado el 18 de Septiembre del 2016 de* [http://www.100autoguias.com/curiosidades/maquinaria/historia/las\\_primeras\\_carretillas\\_elevador](http://www.100autoguias.com/curiosidades/maquinaria/historia/las_primeras_carretillas_elevador)
- [Guzhnay, 2015] Guzhnay, P. G. L. A. ((2015)). Motor brushless dc. *Recuperado el 15 de Abril del 2015 de* <https://es.scribd.com/doc/100367501/Motor-Brushless>.
- [Hambley et al., 2008] Hambley, A. R., Kumar, N., and Kulkarni, A. R. (2008). *Electrical engineering: principles and applications*. Pearson Prentice Hall.
- [Hanselman, 2003] Hanselman, D. C. (2003). *Brushless permanent magnet motor design*. The Writers' Collective.
- [Hernandez, 2013] Hernandez, M. ((24 de Abril del 2013)). Animal politico. *Recuperado el 4 de Noviembre del 2015 de* <http://www.animalpolitico.com/2013/04/mexico-2o-pais-de-al-con-mas-muertes-por-contaminacion-oms/>.
- [HYE, 2012] HYE ((13 de Diciembre del 2012)). Hibridos y electricos. *Recuperado el 18 de Septiembre del 2016 de* <http://www.hibridosyelectricos.com/articulo/actualidad/el-tesla-model-s-mejor-coche-del-ano-2013-por-la-revista-motor-trend-y-automobile/20121213164039004177.html>.
- [Ibanes, 2014] Ibanes ((10 de Abril del 2014)). Xataka. *Recuperado el 10 de Enero del 2016 de* <http://www.xataka.com/automovil/si-quieres-un-coche-electrico-estos-son-los-7-mejores-que-se-pueden-comprar-a-dia-de-hoy>.
- [Kaźmierkowski and Krishnan, 2002] Kaźmierkowski, M. P. and Krishnan, R. (2002). *Control in power electronics: selected problems*. Academic press.
- [Keeping, 2013] Keeping, S. ((27 de Marzo del 2013)). Contributed by electronic products. *Recuperado el 15 de Abril del 2015 de* <http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2013/mar/an-introduction-to-brushless-dc-motor-control>.
- [Kumar et al., 2009] Kumar, B. M., Ravi, G., and Chakrabarti, R. (2009). Sensorless speed control of brushless dc motor with fuzzy based estimation. *Iran. J. Electr. Comput. Eng*, 8(2):119–125.

- [Lita and Cheles, 2008] Lita, A. and Cheles, M. (2008). Sensorless bldc control with back-emf filtering using a majority function. *Microchip Technology Inc.*
- [Maloney, 2006] Maloney, T. J. (2006). *Electrónica industrial moderna*. Pearson Educación.
- [Mano et al., 1998] Mano, M. M., Kime, C. R., and Peake, D. M. (1998). *Fundamentos de diseño lógico y computadoras*. Prentice Hall.
- [Mano and Sánchez, 2003] Mano, M. M. and Sánchez, G. D. (2003). *Diseño digital*. Pearson Educación.
- [Mikroelektronika, 1998] Mikroelektronika ((1998)). Mikroelektronika. *Recuperado el 24 de Octubre del 2015 de* <http://www.mikroe.com/chapters/view/79/capitulo-1-el-mundo-de-los-microcontroladores/>.
- [Mirez, 2010] Mirez, J. ((25 de Septiembre del 2010)). Wordpress. *Recuperado el 14 de Septiembre del 2016 de* <https://jmirez.wordpress.com/2010/09/25/j080-curvas-de-carga-de-una-bateria-de-acido-plomo/>.
- [Muetze and Tan, 2007] Muetze, A. and Tan, Y. C. (2007). Electric bicycles-a performance evaluation. *IEEE Industry Applications Magazine*, 13(4):12–21.
- [Nashelsky, 2003] Nashelsky, L. (2003). *Electrónica, Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*. PEARSON educación.
- [Ogata, 1996] Ogata, K. (1996). *Sistemas de control en tiempo discreto*. Pearson educación.
- [OPPENHEIM et al., 2000] OPPENHEIM, A. V. S., Ronald, W., RONALD W SCHAFFER, J. R., and GARCIA, T. J. P. (2000). *Tratamiento de señales en tiempo discreto*.
- [Patil and Koujalagi, ] Patil, P. J. and Koujalagi, J. P. Modeling and simulation of bldc motor based propulsion system for electric bicycle. *Energy*, 5(30):10.
- [Probattery, 2011] Probattery ((2011)). Energia recargable. *Recuperado el 14 de Septiembre del 2016 de* [http://www.probattery.com.ar/nueva/pdf/Reemplazo\\_PbCaxLiion.pdf](http://www.probattery.com.ar/nueva/pdf/Reemplazo_PbCaxLiion.pdf).
- [Ramos, 2013] Ramos, C. ((27 de Julio del 2013)). Señal de control para motor dc mediante pwm y vhdl. *Recuperado el 15 de Septiembre del 2016 de* <http://www.estadofinito.com/motor-dc-pwm-vhdl/>.
- [Rashid, 2009] Rashid, M. H. (2009). *Power electronics: circuits, devices, and applications*. Pearson Education India.

- [Rashid et al., 2004] Rashid, M. H., González, M. H. R. V., Fernández, P. A. S., González, V., et al. (2004). *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones*. Pearson Educación.
- [RAVE, ] RAVE. Sobre el vehiculo electrico: Difinicion y tipos. *Recuperado el 27 de Diciembre del 2015 de* <http://www.evwind.com/sobre-el-vehiculo-electrico/definicion-y-tipos/>.
- [RENAULT, 2016] RENAULT ((2016)). Renaul twizy. *Recuperado el 20 de Septiembre del 2016 de* <https://www.renault.com.mx/vehiculos/autos-particulares/twizy.html>.
- [Sanchez, 2011] Sanchez, C. R. ((7 de Abril del 2011)). enroquedeciencia. *Recuperado el 17 de Septiembre del 2016 de* [enroquedeciencia.blogspot.mx/2011/04/que-piensa-usted-de-los-coches\\_07.html](http://enroquedeciencia.blogspot.mx/2011/04/que-piensa-usted-de-los-coches_07.html).
- [S.L., 2014] S.L., C. . R. ((2014)). Rebasas. *Recuperado el 14 de Septiembre del 2016 de* <http://www.rebasas.com/blog-baterias/446/>.
- [TERRA, 2007] TERRA ((17 de Diciembre del 2007)). Que es un vehiculo electrico. *Recuperado el 10 de Enero del 2016 de* <http://www.terra.org/categorias/comunidad-ecotransporte/que-es-un-vehiculo-electrico>.
- [Tolrà, 2006] Tolrà, R. J. (2006). Técnicas de control para motores brushless. *Barcelona, España*.
- [Turmero, 2016] Turmero, P. ((2016)). Monografias.com. *Recuperado el 17 de Septiembre del 2016 de* <http://www.monografias.com/trabajos101/control-velocidad-motores-corriente-alterna/control-velocidad-motores-corriente-alterna.shtml>.
- [Tutorials, 2016] Tutorials, E. ((2016)). Electronics tutorials. *Recuperado el 10 de Septiembre del 2016 de* <http://www.electronicstutorials.ws/electromagnetism/hall-effect.html>.
- [Wikimedia, 2006] Wikimedia ((21 de Julio del 2006)). wikipedia. *Recuperado el 18 de Noviembre del 2015 de* <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EdisonElectricCar1913.jpg?uselang=es>.
- [ZzbazZtiian, 2011] ZzbazZtiian ((2 de Diciembre del 2011)). Electronica de potencia. *Recuperado el 24 de Octubre del 2015 de* <http://electronicadepotencia.blogspot.mx/2011/12/convertidores-estaticos-de-energia.html> .