



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
MECÁNICA – MECATRÓNICA

**DESARROLLO DE ELECTRÓNICA EMPLEADA EN LA  
MOVILIDAD DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS**

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
**MAESTRO EN INGENIERÍA**

PRESENTA:  
**ENRIQUE GABRIEL MUNIVE ROLDAN**

TUTOR PRINCIPAL  
DR. ADRIÁN ESPINOSA BAUTISTA, FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM

CIUDAD DE MÉXICO, AGOSTO, 2020



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



# Dedicatoria

Le dedico este trabajo a mi familia que siempre ha estado a mi lado, en las buenas y en las malas, que siempre me ha orientado y apoyado en mis decisiones, que me ha permitido crecer como persona y me ha enseñado que siempre hay que luchar por lo que uno quiere, me enseñaron a no rendirse ante las dificultades, que al caer siempre hay que levantarse, que me enseñó que el conocimiento y la sabiduría son dos cosas distintas, la importancia de la humildad y el siempre hacer lo correcto, por esto y muchas cosas más gracias por todo.



## Agradecimientos

Le agradezco a mi familia porque me enseñó el valor de la vida, por mostrarme el camino correcto, el ayudarme a ser mejor cada día y no dejar que los problemas me derrumben, el siempre levantarse y continuar luchando por tus sueños, el ayudar a los demás incondicionalmente y siempre realizar lo correcto, por creer en mí, por todo el apoyo que me han dado a lo largo de mi vida, por esto y muchas otras cosas más se los agradezco.

Le agradezco a los participantes interesados en formar parte de la fórmula Shell en el equipo Dzec, ya que gracias a su participación fue posible realizar un proyecto más complejo como lo fue este trabajo de tesis, gracias a las tres generaciones que pasaron diversas complicaciones y estuvieron dispuestos a aprender de este tipo de desarrollos, gracias a aquellos que pasaron de ser conocidos a amigos y a aquellos que estuvieron dispuestos a pasar tantas dificultades.

A mis profesores, que me dieron las herramientas para resolver cualquier problema, que me formaron profesionalmente y me permitieron aprender de sus experiencias, que me permitieron crecer y plasmar mis ideas, orientando mis decisiones y dándome una visión más amplia de lo que es la ingeniería.

A todos los investigadores y profesores de otras facultades que me permitieron tener una formación más amplia, que me permitieron aplicar los conocimientos adquiridos y me mostraron la importancia de emplear mis conocimientos para ayudar a los demás, a aquellos que me guiaron y me apoyaron en esta nueva etapa de mi formación.

Por último, quiero agradecer a la Universidad Nacional Autónoma de México que me formó profesionalmente y como persona, permitiéndome tener una visión más amplia de la vida, mostrándome el valor del conocimiento y la importancia de relacionarse con personas de distintas formas de pensar, el ser crítico y objetivo y sobre todo el respetar las diferencias que existen entre las personas.



# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>12</b>
<b>1. Antecedentes</b>	<b>13</b>
1.1. Movilidad en la actualidad . . . . .	13
1.2. A dónde va la movilidad . . . . .	15
1.3. Movilidad eléctrica . . . . .	17
1.3.1. Tipos de movilidad eléctrica . . . . .	17
1.3.1.1. Auto eléctrico . . . . .	18
1.3.1.2. Bicicleta eléctrica y bicicleta eléctrica asistida . . . . .	20
1.3.1.3. Vehículo ultima milla eléctrica . . . . .	23
1.4. Puntos en común de los vehículos . . . . .	24
1.4.1. Baterías . . . . .	24
1.4.1.1. Baterías recargables . . . . .	25
1.4.1.2. Características de las baterías . . . . .	27
1.4.1.3. Baterías de litio . . . . .	30
1.4.1.4. Tipos de baterías . . . . .	31
1.4.1.5. Mantenimiento de las baterías . . . . .	31

1.4.2. Sistema de monitoreo de baterías (BMS) . . . . .	32
1.4.3. Cargador . . . . .	36
1.4.4. Motores . . . . .	40
1.4.4.1. Motores tipo geared hub . . . . .	41
1.4.4.2. Motor tipo mid-drive . . . . .	43
1.4.4.3. Ventajas y desventajas de ambos motores . . . . .	48
1.4.5. Controlador . . . . .	49
<b>2. Introducción</b>	<b>52</b>
2.1. Definición del problema . . . . .	53
2.2. Objetivo y Metas . . . . .	57
2.2.1. Objetivo . . . . .	57
2.2.2. Metas . . . . .	57
2.3. Justificación . . . . .	58
<b>3. Diseño y manufactura del sistema Mecánico</b>	<b>59</b>
3.1. Vehículo prototipo . . . . .	60
3.1.1. Diseño de la versión de prueba (vehículo 1) . . . . .	61
3.1.2. Manufactura de la versión de prueba (vehículo 1) . . . . .	66
3.1.3. Diseño (vehículo 2) . . . . .	77
3.1.4. Manufactura (vehículo 2) . . . . .	78
3.2. Vehículo Urbano . . . . .	83
3.2.1. Diseño . . . . .	83
3.2.2. Manufactura . . . . .	88

<b>4. Diseño y manufactura de la Electrónica</b>	<b>103</b>
4.1. Diseño general del controlador . . . . .	103
4.1.1. Antecedentes . . . . .	107
4.1.2. Controlador para motor de pasos de 5 fases . . . . .	108
4.1.3. Controlador para motor de DC 250 [W] . . . . .	112
4.1.4. Controlador para motor brushless de 5 fases a 1000 [W] . . . . .	114
4.1.5. Controlador para motor de DC 8 [HP] . . . . .	116
4.1.6. Controlador para motor de DC 1 HP . . . . .	120
4.1.7. Controlador para motor brushless de 3 fases a 1000 [W] . . . . .	122
4.2. Diseño general del BMS . . . . .	136
4.2.1. Sensado de voltaje . . . . .	140
4.2.2. Sensado de temperatura . . . . .	143
4.2.3. Sensado de corriente . . . . .	144
4.2.4. Generación de señales . . . . .	145
4.3. Diseño general del Cargador . . . . .	153
4.3.1. Fuente lineal. . . . .	153
4.3.2. Fuente Conmutada. . . . .	154
4.3.3. Diseño . . . . .	155
<b>5. Resultados</b>	<b>164</b>
5.1. Diseño del controlador . . . . .	164
5.1.1. Vehículo prototipo . . . . .	165
5.1.2. Vehículo urbano . . . . .	172

5.2. Manufactura del controlador . . . . .	175
5.2.1. Vehículo Prototipo . . . . .	175
5.2.2. Vehículo urbano . . . . .	176
5.3. Resultados del controlador . . . . .	178
5.3.1. Vehículo prototipo . . . . .	178
5.3.2. Vehículo urbano . . . . .	186
5.4. Cargador y BMS . . . . .	194
5.4.1. Diseño del cargador y del BMS VF1 . . . . .	195
5.4.2. Manufactura del cargador y del BMS VF1 . . . . .	199
5.4.2.1. Resultados del cargador y del BMS VF1 . . . . .	200
5.4.3. Diseño del cargador y del BMS VF2 . . . . .	204
5.4.4. Manufactura del cargador y del BMS VF2 . . . . .	205
5.4.4.1. Resultados del cargador y del BMS VF2 . . . . .	205
5.5. Resultados globales, sobre los vehículos . . . . .	206
<b>6. Trabajo futuro y Conclusiones</b>	<b>215</b>
6.1. Trabajo a futuro del controlador . . . . .	215
6.1.1. Vehículo prototipo . . . . .	215
6.1.2. Vehículo urbano . . . . .	215
6.2. Trabajo a futuro del BMS con cargador . . . . .	216
6.2.1. BMS . . . . .	216
6.2.2. Cargador . . . . .	216
6.3. Trabajo a futuro del los vehículos . . . . .	216
6.4. Conclusiones . . . . .	217

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	11
<b>7. Apéndices</b>	<b>220</b>
7.1. Vehículo 3 . . . . .	220
7.2. Vehículo Urbano Modificado . . . . .	222
7.3. Nuevo controlador . . . . .	223
<b>Bibliografía</b>	<b>224</b>
<b>Referencias</b>	<b>225</b>

# Resumen

Se realiza el diseño, manufactura e implementación de la electrónica necesaria para que funcione un auto eléctrico en la vida cotidiana, esta electrónica está constituida por un controlador trifásico para motores brushless de 3 fases a 1000 [W] de potencia, una BMS (Sistema de Monitoreo de Baterías) para baterías de litio en un banco de 48 [V] nominales así como también un cargador para el banco de baterías de 48 [V], todos estos sistemas electrónicos se colocan en dos vehículos y se evalúa su funcionamiento.

El trabajo está dividido en tres áreas fundamentales (Antecedentes, Diseño y manufactura del sistema Mecánico, diseño y manufactura de la Electrónica), en los antecedentes se da una visión general de lo que existe actualmente, se describen lo que son los controladores, sus tipos, motores así como lo que es un vehículo eléctrico y cuál es su crecimiento en la movilidad actual, se da la visión general de lo que es un BMS, para que sirva así como su importancia y la función que tiene un cargador y la relevancia que tienen estos dos últimos sistemas en el cuidado de las baterías, en el caso del diseño y manufactura del sistema mecánico se habla del trabajo realizado para fabricar dos autos, los cuales sirven tanto para realizar pruebas de la electrónica desarrollada en este trabajo, como para la formula Shell Eco Marathon, se muestra el proceso generalizado seguido para lograr construir estos vehículos, por último en la sección correspondiente al diseño y manufactura de la electrónica, se habla del tema principal de este trabajo de tesis, se muestran los antecedentes y la evolución que se ha tenido en el desarrollo de electrónica para vehículos eléctricos, se muestran los pasos que se han ido generando a lo largo de los años, resultado de la investigación y la experimentación sobre sistemas reales.

Por último, en el capítulo de resultados se muestra la implementación y sobre los dos vehículos, así como también se muestran los tres sistemas electrónicos diseñados, fabricados e implementados, no solamente en el laboratorio si no en vehículos eléctricos construidos para ser usados por esta electrónica.

# Capítulo 1

## Antecedentes

En este capítulo se dan los antecedentes del estado actual de la movilidad, referenciando a las páginas de dónde fue obtenida la información mostrada, dado a que gran parte de esta información son datos así como también de referencia, se toma tal cual se obtuvo de las páginas ya que son únicamente referencias del trabajo, pero debido a que la explicación dicha por cada una de las páginas expresan lo que se quiere resaltar y para no cambiar la esencia del mensaje, se realizan pocos cambios a lo escrito únicamente para complementar la información encontrada en dichas páginas.

Así como también se va introduciendo a los temas principales a abordar en este trabajo de tesis, dando una descripción general de los mismos, principios de funcionamiento y la importancia que tienen para la movilidad eléctrica, dando al final de cada sección un resumen de lo expuesto.

### 1.1. Movilidad en la actualidad

Los problemas de movilidad urbana son uno de los problemas actuales más complejos de resolver en las ciudades, no solo por la cantidad de personas que involucra el problema, sino también por la infraestructura que se debe construir sobre la ya existente, el cambiar la forma de actuar y pensar de las personas (los hábitos de movilidad existentes), además de proveer un sistema de movilidad de calidad, eficiente y de bajas emisiones. [R1]

La página [R1] nos da la siguiente información: en 21 países de América Latina hay 570 millones de habitantes, el 85 % vive en zonas urbanas, cuatro mega ciudades tienen más de 10 millones y cinco más de 5 millones. Estos datos nos dan una referencia del impacto de la cantidad de

personas a las cuales se les involucra y sirven de indicadores para conocer la complejidad de cambiar los hábitos de movilidad de la población.

“El verdadero problema de la movilidad urbana actual es que estamos construyendo ciudades alrededor del automóvil particular y no alrededor de las comunidades.” [R2]

Actualmente la mayor problemática existente en las avenidas de las ciudades se debe a la excesiva congestión de vehículos particulares.

“Las estadísticas de la Sedema de la CDMX indican que se realizan 22 millones de traslados al día con un promedio de duración de 1.5 horas, tiempo que es impactado por los 5.5 millones de coches circulando en las calles.” Aproximadamente, el 65 % de la inversión en la ciudad se utiliza para la infraestructura vial y estacionamientos. Además, 45 % del petróleo se utiliza para combustible de vehículos ligeros y es precisamente la contaminación atmosférica el principal riesgo ambiental para la salud en el continente americano según la OMS, la cual también estimó que cada año mueren cerca de 1.3 millones de personas en las carreteras del mundo entero e indica que los accidentes viales son una de las principales causas de muerte en el mundo.” [R2]

Pero es posible ver el problema de movilidad como un área de oportunidad ya que un vehículo particular tiene una tasa de uso de sólo el 4 % y en promedio lo abordan sólo 1.2 personas por vehículo mientras la capacidad usual es de 4 a 5 personas, de aquí es que el esquema de movilidad puede partir, ya sea a permitir o incentivar nuevos medios de transporte individuales así como también mejorando el transporte existente. [R2]

Ninguna ciudad en México tiene opciones de transporte que reduzcan las horas perdidas durante los traslados, ni los impactos de esto sobre la salud y el medio ambiente. [R3]

Las que mejor desempeño tienen en movilidad son solo tres, el Valle de México, Saltillo y Guadalajara, pero incluso éstas enfrentan grandes retos de inseguridad y en calidad del aire. Así lo documenta el Índice de Movilidad Urbana (IMU) presentado por el Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO), el cual evalúa 20 ciudades, que se componen de 203 municipios, donde se concentra el 43 % de la población nacional y el 68 % de la actividad económica urbana. [R3]

Uno de los desafíos que más preocupan a las ciudades del siglo XXI es el tráfico. Aunque no es el único reto al que se enfrentan, lo cierto es que la cuestión de la movilidad urbana es un eje esencial en la planificación de las grandes urbes y zonas metropolitanas. [R4]

Varios datos nos ayudan a hacer una idea de la dimensión del problema la que nos enfrentamos. Un reciente estudio de la ONU revela que la población urbana mundial crecerá un 75 % en las próximas cuatro décadas, con todo lo que ello implica (movilidad incluida). La cuestión medioambiental es otro aspecto a tener en cuenta. Aunque las ciudades ocupan poco más del

2% del planeta, ya representan entre el 60% y el 80% del consumo de energía, y el 75% de las emisiones de CO<sub>2</sub>. [R4]

**De todo lo presentado, se observa que el impacto de un buen sistema de movilidad en las ciudades es evidente, no sólo en la reducción de la contaminación existente si no además en los tiempos de traslado, los cuales pueden llegar a ser exagerados (2 horas para recorrer distancias de 10 km), pero así como el impacto puede ser grande, también lo es el reto debido a la cantidad de personas que lo involucran, así como la infraestructura a construir sobre las ciudades que en general ya se encuentran saturadas en sus vialidades y transportes. Pero aunque el problema es grande no son imposible y los beneficios a largo plazo son mayores si es que se logra llevar acabo el cambio en los sistemas de movilidad.**

## 1.2. A dónde va la movilidad

La movilidad urbana es entonces un factor determinante tanto para la productividad económica de la ciudad como para la calidad de vida de sus ciudadanos. [R5]

Pero la gestión del desarrollo urbano es una tarea compleja que involucra múltiples niveles de gobierno, así como diversas instituciones públicas y privadas. Para lograr resultados óptimos en esta materia, los expertos sugieren: [R5]

- Establecer una sinergia entre el transporte, la accesibilidad, la movilidad y la gestión urbana. [R5]
- Promover el intercambio de información y buenas prácticas entre sistemas de transporte y sus ciudades. [R5]
- Establecer redes de cooperación regionales, entre profesionales, autoridades, asociaciones y usuarios. [R5]

La innovación en el sector de la movilidad, impulsada por el big data, la tecnología y el cambio en los hábitos del consumidor, está provocando que las ciudades planifiquen la movilidad de una forma diferente. [R6]

El coche autónomo, cuyo impacto veremos a corto plazo no solo en el ámbito privado sino también en el transporte público, los vehículos eléctricos y la conectividad son los principales actores que están influyendo en el cambio de modelo de la movilidad en las ciudades. [R6]

“Entre las medidas que se están implementando en algunas ciudades europeas destaca el fomento del vehículo eléctrico.” [R6]

Vivir en una ciudad con millones de habitantes cómo es la Ciudad de México puede ser bastante caótico cuando se trata de movilidad. Además de enfrentarse con tráfico y mucho estrés, se ocasiona una gran contaminación en el medio ambiente debido a los gases que liberan los motores de combustión. [R7]

Afortunadamente, con ayuda de iniciativas privadas ya existen apps que brindan un transporte ecológico y saludable (como son las bicicletas y los scooters), lo que da otras opciones para no depender de los sistemas de transporte público que implementan los gobiernos. [R7]

Pero hablar de bicicletas ecológicas y scooters no solo es cosa de México. Hoy más de 600 ciudades alrededor del mundo tienen sus propios sistemas de bicicletas públicas y cada año se inauguran más. Los sistemas más grandes se encuentran en China, Europa y Estados Unidos. [R7]

Aunque México apenas está comenzando a implementar este sistema de bicicletas y scooters privados, en otras grandes ciudades ya se ha puesto de moda, algunas de estas ciudades, así como los problemas que se enfrentan y la solución que están dando se describe a continuación: [R7]

- **Beijing, China**

Debido a la gran contaminación que hay en la ciudad, se han implementado varias acciones para incrementar el uso de bicicleta, se estima que la ciudad cuente con 50 mil bicicletas para todo el público. [R7]

- **París, Francia**

En los últimos años, París ha encontrado nuevas soluciones de movilidad, con varios operadores de bicicletas compartidas y compañías de motocicletas eléctricas que ofrecen servicios en la capital francesa. [R7]

- **Barcelona, España**

Esta ciudad cuenta con 100 estaciones para rentar y estacionar bicicletas, así como señalamientos y mapas específicamente diseñados para los ciclistas. [R7]

- **Londres, Inglaterra**

Aunque el carril para bicicletas no es muy habitual, hay un respeto único y adaptado hacia los ciclistas, por lo que el riesgo se reduce ampliamente. La bicicleta es un medio perfecto para moverte por las calles de la capital británica. Además de cuidar el medio ambiente, el uso de las bicicletas y scooters eléctricos han ayudado a promover el ciclismo como un sistema de transporte valioso y viable. [R7]

De esta sección queda resaltar que aunque México está empezando a involucrarse en nuevos sistemas de movilidad, aun falta mucho trabajo para lograr resultados visibles, partiendo del respeto al ciclista y al motociclista es decir la educación de los conductores, no solo de los automovilistas y transporte público, si no también cultura del mismo ciclista y los motociclistas, así como también la construcción de infraestructura y un cambio en la mentalidad de la ciudadanía.

### 1.3. Movilidad eléctrica

#### 1.3.1. Tipos de movilidad eléctrica

Como se ha visto en los últimos años, la movilidad eléctrica es una de las opciones que se está tomando como un paso para disminuir los índices de contaminación atmosférica en las grandes ciudades, adicionalmente también se están presentando como nuevas alternativas para disminuir la cantidad de vehículos en circulación, las bicicletas, los scooters, un transporte público de buena calidad, por mencionar algunos.

También actualmente se están incentivando los cambios de los vehículos empleados para el desplazamiento, cada vez hay más personas que están optando por adquirir vehículos eléctricos para sus trayectos y aprovechan todas las ventajas de este tipo de movilidad (no solo en el consumo, sino también los incentivos que se dan para emplear este tipo de vehículos), que se presentan como la mejor alternativa a los vehículos propulsados por combustibles fósiles.

Los vehículos eléctricos es decir aquellos que están impulsados por un propulsor eléctrico y alimentado por una batería la cual se carga a través de la red eléctrica, dejan una huella ambiental de cero emisiones al emplearse y su uso implica un ahorro considerable en el tráfico de las ciudades, aunque sus ventajas no acaban ahí.

Hoy en día existen diversos vehículos, ya que es un campo en crecimiento, entre los más importantes se pueden destacar el auto eléctrico, camiones eléctricos (estos dos impacta directamente en las emisiones de vehículos impulsados por gasolina), las bicicletas eléctricas, así como las motocicletas eléctricas y en una última instancia se pueden considerar los vehículos última milla que son vehículos enfocados a movilizar al individuo en su último tramo (vehículos de corta distancia).

**En este trabajo trataremos de abordar algunos de estos vehículos, principalmente enfocando la investigación a la electrónica que compone a los vehículos.**

### 1.3.1.1. Auto eléctrico

El auto eléctrico es posiblemente el más representativo a lo que se refiere movilidad eléctrica, ya que siempre que se menciona movilidad eléctrica este es el primero en venir a la mente de las personas.

Durante los últimos años, los autos eléctricos se han convertido en uno de los bienes con más popularidad (y con más crecimiento) en muchos países, gracias a que cuentan con una tecnología motora mucho más limpia que los coches regulares (los de combustión), con la desventaja de que al ser una tecnología de reciente expansión más no de reciente creación, los costos de la misma es más elevada en comparación al auto convencional de gasolina, pero sus ventajas poco a poco van siendo evidentes. [R10]

Actualmente a este tipo de autos se les conoce como “automóviles de cero emisiones” debido al tipo de combustible que emplean (si son completamente eléctricos: no emiten gases CO<sub>2</sub> ni cualquier otra partícula que pueda llegar a contaminar el medio ambiente), aunque la realidad es que en la actualidad no son 100% limpios ya que es necesario cerrar el ciclo de vida de estos vehículos, ya sea por el desecho de las baterías, así como la forma de cargar los vehículos, la cual en muchos casos proviene de centrales eléctricas que emplean combustibles fósiles para operar. [R10]

Aunque en este punto, el crecimiento de esta tecnología, a estos vehículos se les considera primordiales para contribuir con el cambio climático.

Actualmente existe una gran variedad de carros eléctricos en el mundo, sin embargo, son pocos los que se encuentran a la venta en México gozando de muchos beneficios ya que están exentos de la verificación vehicular y del programa ‘hoy no circula’ por ocho años. [R10]

A continuación, se mencionarán algunos de estos vehículos, así como algunas de sus características:

- **Renault Twizy**

- Este pequeño vehículo eléctrico proporciona una solución energética única para la vida en la ciudad: se carga en 3.5 horas utilizando un punto de energía doméstica junto a un adaptador y tiene un rango de conducción de 100 km en ciclo urbano. El Renault Twizy tiene un diseño futurista. Es tan pequeño que lo podrás estacionar donde quieras, incluso en horizontal. [R10]
- Con un costo inicial de \$312 mil 700 pesos, el Twizy lidera la lista por ser el auto eléctrico más económico con disponibilidad en México. [R10]

- **Zacua M2**

- Funciona gracias a un motor eléctrico para auto PMSM, la batería tiene una vida de 3,000 ciclos (cargas de 0 a 100 %), lo que se puede traducir a 8 años de vida (si se carga desde el mínimo hasta completitud todos los días), cuenta con teléfono integrado, navegación por Internet, acceso a email, redes sociales y a un sistema envolvente de audio. [R10]

- **Tesla Model 3**

- El Tesla Model 3 es un automóvil eléctrico de Tesla mucho más pequeño que el modelo S y con un precio más accesible: empieza en los \$35 mil dólares y se tiene que hacer previo encargo para comprarlo. Aunque no es el modelo más avanzado ni el más lujoso de la marca, está muy bien equipado. [R10]

- **Chevrolet Bolt EV**

- El Chevrolet Bolt es un auto eléctrico que requiere instalación profesional para recargar en contactos estándares de 120V con la unidad de 240V. También tiene carga ultra-rápida de corriente directa, disponibles en espacios públicos. [R10]
- Además, cuenta con una función para disminuir la velocidad desde el volante, lo que evita perder energía al pisar el pedal del freno y ayuda a conservar electricidad para recorridos más largos. Su rango de autonomía es de 383 km de recorrido en cada carga completa que reciba. Su costo comienza en los \$750 mil pesos. [R10]

- **BMW i3**

- El BMW i3 es el primer auto eléctrico que se ha diseñado íntegramente sostenible desde su desarrollo hasta su fabricación, sus características más relevantes: [R10]
- Posee un motor de gasolina de dos cilindros que acciona un alternador que se enciende automáticamente en caso de necesidad y mantiene constante el nivel de carga de la batería. En su producción se utilizan energías renovables en donde el 95 % del vehículo puede reciclarse. Durante el proceso de producción es posible reutilizar las fibras de carbono. [R10]

- **Tesla Model S**

- El Tesla Model S es considerado como uno de los mejores autos eléctrico hasta el momento gracias a que posee la mayor distancia de autonomía con 500 km antes de la recarga de batería. Su precio empieza en \$1 millón 636 mil pesos y su lujo en el interior del coche lo demuestra. [R10]
- Este carro eléctrico cuenta con doble motor, uno delantero y uno trasero, con los que controla de forma digital e independiente las ruedas delanteras y traseras, dando

como resultado un control de tracción incomparable en todas las condiciones y una aceleración de 0 a 100 km en tan sólo 2.7 segundos. [R10]

#### ■ Auto eléctrico Tesla Model X

- Según la marca Tesla, el Model X es “el auto eléctrico y deportivo todoterreno más seguro, rápido y capaz de la historia”: tiene una autonomía de 470 km con un amplio espacio para siete adultos sentados y todo su equipaje, considerado por esto como la SUV eléctrica por excelencia. Su costo inicial de \$1 millón 774 mil pesos reflejados en el lujo que caracteriza a este coche. [R10]
- Actualmente existen aproximadamente 500 mil electrolíneas en el país, y ya se está trabajando en la construcción de centros de recarga en diferentes puntos dentro de las grandes ciudades. [R10]

#### 1.3.1.2. Bicicleta eléctrica y bicicleta eléctrica asistida

Cuando se habla de transporte eléctricos inicialmente se piensa en vehículos híbridos y totalmente eléctricos, pero hay otro medio de transporte que está ganando cada vez más seguidores, estamos hablando de las bicicletas eléctricas las cuales son poco conocidas en nuestro país, pero son los vehículos eléctricos más vendidos en todo el mundo ya que son un método de transporte eficaz y barato.



Figura 1.1: Bicicleta eléctrica. [R23]

La bicicleta “tradicional” cada vez está ganando más adeptos, debido a que no necesita licencia de conducir, ni pagan impuestos o seguros obligatorios, a lo que unido con la prácticamente ausencia de mantenimiento (o poco mantenimiento) las convierte en una buena opción para los

que quieren dejar el coche en casa, sin hablar de la reducción de emisiones o las mejoras que han hecho algunas ciudades en carriles bicicletas.

Pero si alguna vez has tomado alguna bicicleta para moverte por la ciudad, habrás sufrido alguna vez las cuestas, las largas distancias o el viento en contra que no hay manera de evitarlo, pero que provocan que llegemos a nuestro destino más cansados o sudados, cosa que no es de mucho agrado o que preferimos evitar. Esas son algunas de las limitaciones de la bicicleta “tradicional”, cosa que la bicicleta eléctrica elimina.

Dado que la batería y el motor de una bicicleta eléctrica poseen riesgos que no tienen las bicicletas normales, estas deben estar sujetas a una serie de normas y regulaciones. La categorización de vehículos y legislación relacionada a bicicleta eléctrica y/o LEV (Vehículo Eléctrico Ligero de peso inferior o igual a 400 kg) es un término, que abarca dos conceptos diferentes de vehículos con un motor eléctrico auxiliar:

1. Los equipados con un motor auxiliar que no puede ser exclusivamente impulsado por ese motor, sólo cuando los pedales son movidos por el ciclista puede iniciar el motor su movimiento o asistencia. Estos vehículos son generalmente llamados pedelecs o bicicletas que asisten al pedaleo.
2. Bicicletas equipadas con un motor eléctrico auxiliar que puede ser exclusivamente impulsado por ese motor. El ciclista no está necesariamente obligado a pedalear. Estos vehículos son generalmente llamados E-bikes.

En la legislación europea se restringe bastante la consideración de bicicletas a efectos de circulación ya que para ser considerada bicicleta obliga a que el apoyo del motor esté directamente relacionado con el pedaleo, es decir el sistema “pedelec”.

El otro requisito para que una bici eléctrica sea legal, es que el motor no podrá superar los 250 [W] de potencia y 25 [km/h] de velocidad máxima, cantidades muy justas a la hora de enfrentar algunas subidas pronunciadas, además también debe cumplir que no superen un peso de 40 [kg].

Lo anterior quiere decir que las bicicletas de pedaleo asistido con un motor que proporciona una velocidad de más de 25 km/h, y las e-bikes diseñadas para tener una velocidad máxima superior a 25km/h, se clasifican como motocicletas convencionales y tienen que ser homologados en consecuencia.

Una clasificación de ciclomotor trae consigo la obligatoriedad de llevar un casco, de contratar una póliza de seguros y un límite de edad, en algunos casos, también implica un número de matrícula y una licencia de conducir.

En países menos restrictivos, no han puesto límites y uno puede hacerse con una bicicleta con las prestaciones de una motocicleta, con modelos que alcanzan los 100 km/h y que por supuesto, no necesitan ni siquiera pedalear.

En estos últimos años, se ha puesto en la mira el mejoramiento de la experiencia del ciclismo sobre todo recreativo, pues cada día más personas alrededor de todo el mundo deciden cambiar su sistema de transporte a la bicicleta.

Por ello es que compañías como lo son Bosch, Shimano y Yamaha, entre otras más, se han dedicado a crear una manera de brindar al ciclista una manera de hacer su trayecto menos desgastante, y así han surgido las bicicletas asistidas mediante un motor eléctrico, el cual se encuentra en la intersección inferior de los tubos que componen el cuadro, sustituyendo así el eje delantero por un motor eléctrico al que están acoplados los pedales.

De esta manera, el usuario tiene la capacidad de escoger un porcentaje de asistencia al pedaleo, reduciendo la potencia que éste debe imprimir para avanzar y por lo tanto la energía que requiere para moverse.

Dentro del mundo de las bicicletas eléctricas el sistema de asistencia en el pedaleo más comúnmente utilizado se trata de sistemas en mid-drive, la Figura 1.2 es un ejemplo de tal sistema, incorporados a la bicicleta desde su fabricación.



Figura 1.2: Sistema de asistencia de pedaleo Bosch Performance Line.

Es decir, la bicicleta se concibe, diseña y se fabrica teniendo en mente la manera en que se puede desarrollar el acoplamiento al motor, así como el posicionamiento y conexión mecánica y eléctrica del paquete de baterías, tomando como referencia el concepto original de la bicicleta.

Los componentes que fungen como dispositivo de asistencia se encuentran sobre el cuadro, usualmente son colocados sobre el tubo diagonal, el cual es una de las partes principales de la bicicleta.

Esto limita el uso de este tipo de motores a aquellas bicicletas que hayan sido producidas con el fin de ser bicicletas asistidas desde el principio, de tal manera que resulta imposible incorporarlo a una bicicleta convencional ya que el cuadro de la misma es diferente.

### 1.3.1.3. Vehículo ultima milla eléctrica

Este tipo de vehículos han tenido un crecimiento considerable en los últimos años en México, aunque en otras grandes ciudades ya se vienen aplicando desde hace algún tiempo.

Dentro de este concepto puede llegar a entrar lo que es la bicicleta he incluso la bicicleta eléctrica y la bicicleta eléctrica asistida, pero debido a que estos vehículos pueden recorrer distancias superiores a los 10 km, en este apartado no se hablará de ellos.

De entre los vehículos que más han crecido bajo este concepto se pueden encontrar los scooters eléctricos, los cuales suponen una excelente opción de micromovilidad para trasladar personas bajo el concepto "la última milla". Es decir, recorrer distancias que podrían resultar demasiado grandes para ser hechas a pie, pero considerablemente cortas para hacerlas a bordo de un auto [R25].

Contrario al uso de una bicicleta, estos vehículos no requieren de un esfuerzo físico para ser utilizados y además, desprenden al usuario del concepto de pertenencia, a través de servicios de renta.

Aunque no todo es bueno en este tipo de vehículos, en algunas grandes ciudades donde este tipo de vehículos se han implementado han surgido una serie de complicaciones en su empleo como la incertidumbre jurídica para quienes ofrecen este servicio, acumulación de estas unidades en espacios públicos y reglas poco claras sobre las responsabilidades de su uso.

Aunque este tipo de vehículos tienen cosas buenas como malas, es una buena opción para desarrollar y de esta forma disminuir el uso del automóvil, aunque falta camino por recorrer tanto en normas y reglamentos en el uso de estos, ya que es un tipo de vehículo muy nuevo en las grandes ciudades, el scooter u otro tipo de vehículo de este estilo permitirán en su momento el crecimiento en lo que se refiere a movilidad urbana. [R9]

## 1.4. Puntos en común de los vehículos

### 1.4.1. Baterías

La batería también conocida como pila o acumulador es un dispositivo que almacena energía eléctrica, mediante el uso de procesos electroquímicos, luego dicha energía es devuelta en casi toda su totalidad.



Figura 1.3: Baterías de litio. [2]

El término “pila”, en castellano, denomina a los generadores de electricidad basados en procesos químicos normalmente no reversibles, o acumuladores de energía eléctrica no recargables; mientras que “batería” se aplica generalmente a los dispositivos electroquímicos semirreversibles, o acumuladores de energía eléctrica que sí se pueden recargar. [R26]

Tanto pila como batería, son términos provenientes de los primeros tiempos de la electricidad, en los que se juntaban varios elementos o celdas (para el diseño nos centraremos en las baterías). [R26]

Las baterías pueden tener diversas tecnologías en sus celdas electroquímicas y pueden ser de NiCd, NiMH, Zinc-Aire, Li-Ion, etc.

Según su tecnología podemos encontrar celdas primarias y celdas secundarias. [R26]

1. Las primarias son aquellas que transforman la energía química en eléctrica de manera “irreversible”.
2. Las secundarias pueden ser recargadas de nuevo y son las aptas para nuestro caso.

Las celdas aportan energía eléctrica gracias a un proceso conocido como REDOX (reducción-oxidación) en el que uno de los materiales que compone la celda se oxida (pierde) y el otro se reduce (gana electrones). Los materiales podrían volver a su estado inicial bajo ciertas circunstancias que se producen durante la carga de la batería. Cada celda consta de dos electrodos del mismo o distinto material y de un electrolito en el que están sumergidos. [R27]

La tecnología de la batería ha avanzado mucho empleando diferentes materiales como: ácido-plomo, pila-seca (con electrodos de cinc y carbono, y yeso o cartón como electrolito), mercurio y otros metales pesados altamente tóxicos y contaminantes, NiCd (Níquel-Cadmio para los electrodos e hidróxido de potasio para el electrolito), Fe-Ni (con electrolito de hidróxido de potasio), alcalinas (con cátodo de dióxido de manganeso y ánodo de zinc, con electrolito alcalino), NiMH (níquel metal hidruro), las de litio (pila de litio con cátodo con sustancias como sulfuro de hierro, dióxido de manganeso, dióxido de azufre, cloruro de tionilo, monofluoruro de carbono, . . .) y finalmente las de iones de litio (con su variante de Ion-Li y Polímero). [R27]

#### 1.4.1.1. Baterías recargables

Algunas de las propiedades de las baterías recargables más usuales son: [R27]

- Plomo-ácido [R27]
  - Con dos electrodos de plomo (sulfuro de plomo o  $\text{PbSO}_4$ ) y electrolito de ácido sulfúrico.
  - Son recargables en cierta medida, ya que cuando se produce la cristalización en el sulfuro dejan de responder adecuadamente.
  - Son muy baratas y fáciles de fabricar, pero contaminantes, pesadas y con baja densidad de energía (30 Wh/kg).
  - Empleadas sobre todo en automoción y sistemas fotovoltaicos.
- Ni-Fe [R27]
  - Las de ferro-níquel, ideadas por Thomas Alba Edison, tienen electrodos de acero niquelado (el cátodo relleno de hidróxido de níquel o  $\text{NiOOH}$  y el ánodo de óxido ferroso en polvo o  $\text{FeO}$ ) y un electrolito líquido de potasa cáustica o  $\text{KOH}$  (20 %) disuelto en agua (80 %).

- Sus ventajas son similares a las de plomo-ácido, pero no es contaminante, no contiene metales pesados, su vida es más prolongada y el electrolito se puede reciclar y destinar al sector agrícola.
  - Su eficiencia solo es del 65 % y su densidad de energía de 40 Wh/kg.
- Ni-Cd [R27]
    - Con cátodo de hidróxido de níquel, ánodo de cadmio y electrolito de hidróxido de potasio.
    - Su densidad de energía sigue siendo baja, unos 50Wh/kg y tiene un efecto memoria muy alto.
    - Como ventajas, que admite sobrecarga y que funciona en un amplio rango de temperaturas.
  - Ni-MH [R27]
    - Con un ánodo de hidróxido de níquel y un cátodo de alguna aleación de hidruro metálico.
    - Poco afectada por el efecto memoria y con densidad de energía de 80 Wh/kg.
    - No admite bien el frío y su entrega de potencia bajo dichas condiciones es deficiente.

Actualmente las baterías más usadas en todos los aparatos son las de iones de litio por sus ventajas. Aparecen por primera vez en los 80, cuando John B. Goodenough y su equipo de investigación (Sony) consiguieron crearlas. [R27]

En 1996 se crea una variante, la de polímero, que sustituye al anterior electrolito por un polímero sólido compuesto, electrodos y separador laminados (estas celdas son flexibles) cuyas propiedades son: [R27]

- Ion-Li [R27]
  - Con ánodo de grafito y cátodo de óxido de cobalto, trifilina (LiFePO<sub>4</sub>) u óxido de manganeso. En el electrolito líquido hay iones de lítico que serán los encargados de aportar energía.
  - Apenas sufre efecto memoria, consiguen altas densidades de energía (115Wh/kg), se pueden cargar sin necesidad de estar totalmente descargadas y sin reducción de su vida útil.
  - La temperatura es un punto flaco, ya que a altas temperaturas comienzan a perder eficiencia.

- Tampoco toleran bien las descargas completas y sufren daños.
- LiPo [R27]
  - Las de polímero son similares a las anteriores, pero con mejor densidad de energía y una tasa de descarga superior.
  - Pero los estragos cuando se descargan completamente son altos, pudiendo quedar casi inutilizadas.

Otras baterías han aparecido, como las de Ion-Metal (aluminio, potasio o sodio) o las de zinc-aire, pero son menos comunes.

**De lo anterior expuesto se puede concluir que existen diversos tipos de baterías con capacidades y comportamientos químicos diferentes, pero que en esencia son los mismos, y por lo que es importante resaltar que la elección de la batería a emplear dependerá del uso que se le dará y de la necesidad que debe cumplir.**

#### 1.4.1.2. Características de las baterías

Las características típicas de una celda y las que tendremos que analizar para elegir una buena batería son las siguientes:

1. Tensión o voltaje (V) [R27]
  - a) Se mide en voltios y nos muestra la capacidad voltaica de una celda o batería completa.
  - b) Depende del proceso de REDOX y normalmente están entre 1v y 4v, dependiendo de la tecnología y tipo de celda.
  - c) Mientras mayor sea, mayor la potencia del equipo.
2. Corriente o intensidad (A) [R27]
  - a) Se mide en amperios o en ocasiones en mA (miliamperios).
  - b) Nos da una idea de sus prestaciones, por ejemplo, si nuestra meta es mover un motor eléctrico con una batería y queremos que este tenga mayor par, lo mejor es seleccionar una batería con más intensidad.
3. Potencia [R27]
  - a) Depende de la intensidad y de la resistencia interna.

- b) Indica la capacidad de una celda para suministrar energía por unidad de tiempo.
  - c) Se ve limitada por la temperatura, debido a la variación de la resistencia interna (aunque se mantengan la corriente constante).
4. Capacidad de carga (Ah) [R27]
- a) Muy importante, ya que muestra la capacidad de entregar carga con respecto al tiempo.
  - b) Se mide en Amperios-Hora o en algún submúltiplo de estos. Por ejemplo, una batería de 1,300mAh quiere decir que puede entregar 1.3A durante una hora, así que mientras mayor sea esta unidad, más durará la batería antes de descargarse.
5. Capacidad (Culombio o Ah) [R27]
- a) Se puede medir en Culombios o en Ah, pero en este caso hace referencia a los tiempos de carga y descarga.
6. Energía (J o Wh) [R27]
- a) Se mide en Watt-hora o en Julios y expresa la energía que puede suministrar la celda o batería.
  - b) Depende de la capacidad de la batería y de la potencia (ligada a su vez a la intensidad y voltaje).
7. Resistencia interna ( $\Omega$ ) [R27]
- a) De ella depende la intensidad de carga que pueda suministrar una batería.
  - b) Las celdas de plomo-ácido rondan los 0'006 ohmios, 0'009 para las de Ni-Cd.
  - c) La resistencia interna varía de valor con respecto a la temperatura (concretamente disminuye al aumentar la temperatura), por eso ciertas baterías padecen el calor y lo reflejan en su rendimiento.
8. Tolerancia a la temperatura [R27]
- a) Entre las distintas celdas y materiales, hay algunas que toleran mejor las temperaturas extremas que otras.
  - b) Si la batería va a trabajar en entornos hostiles en este sentido, conviene asegurarnos de que funcionará en un rango de temperatura requerido. Por ejemplo, una batería de Li-Ion puede autodescargarse más rápidamente con forme se eleva la temperatura, pudiendo llegar a pérdidas de carga del 0'3% al día a 21°C, casi un 0'6% a 40°C y un 1'2% a 60°C.

9. Energía específica (Wh/kg) y Densidad de energía (Wh/l) [R27]
  - a) Es la relación entre el peso y la energía almacenada de una celda o batería, y entre la capacidad energía almacenada y el volumen.
  - b) Se puede medir en Wh con respecto a los kilogramos o a los litros.
  - c) Mientras mayor sea, más pequeña y ligera podrá ser la batería, algo muy a tener en cuenta en aparatos delgados o en baterías para motosport.
10. Densidad de potencia (W/l) y Potencia específica (W/kg) [R27]
  - a) Es la cantidad de vatios por unidad de peso o volumen, que puede suministrar la batería.
11. Rendimiento [R27]
  - a) Es la relación entre la energía recibida durante la carga de la batería y la entregada durante su utilización. Por ejemplo, las de plomo pueden llegar al 90 %, las de Ni-Cd al 83 % y las de Ion-Li de 80-90 %. Esto quiere decir que ese % de energía de la que se suministró para cargar la batería, será entregada (útil) y no se perderá en forma de calor.
12. Constante de carga/descarga C [R27]
  - a) Es una variable ideada por los fabricantes para marcar la intensidad de corriente óptima a la que puede cargarse y descargarse la batería sin sufrir daños.
  - b) Se puede calcular dividiendo la capacidad en mAh entre 1000. Así por ejemplo una batería de Ion-Li de 1800mAh tendrá una C de 1.8, lo cual quiere decir que el cargador de dicha batería no debe superar los 1.8 A para no dañarla.
13. Efecto memoria [R27]
  - a) Es un fenómeno no deseado que afecta a las baterías y que consiste en que cada vez que se recarga la batería, esta irá perdiendo capacidad o voltaje al formarse cristales en sus celdas electroquímicas.
  - b) Las causas, además del tipo de tecnología empleada, están relacionadas con tiempos de carga prolongados más allá del tope, altas temperaturas y cargas con corrientes elevadas.
  - c) Una temperatura ambiente elevada y una depresión del voltaje por sobrecarga pueden causar síntomas similares al efecto memoria pero transitorios.
14. Durabilidad de ciclos [R27]

- a) Está ligado a lo anterior y a otros parámetros, indica la cantidad de ciclos soportados de carga/descarga. Por ejemplo, las modernas baterías de Ion-Li pueden durar entre 400 y 1200 ciclos hasta su defunción.

Por lo expuesto anteriormente nos centraremos en las baterías de Litio, lo que no excluye a las demás pero si restringe los parámetros de operación de este diseño los cuales pueden ser cambiados y adaptados a otro tipo de batería.

#### 1.4.1.3. Baterías de litio

La autonomía en los aparatos eléctricos que emplean baterías aumenta mucho gracias a las nuevas maneras de almacenamientos de energía con mayor densidad energética. Aunque por supuesto no depende solo de la batería sino también de los consumos de estas no se puede ignorar que la batería juega un papel decisivo en la autonomía.

En la siguiente tabla (Tabla 1.4) se hace una comparativa de las características más importantes a la hora de la elección de una batería entre distintos tipos de estas.

TIPO DE BATERÍA RECARGABLE	ENERGÍA (WH / KG)	ENERGÍA/VOLUMEN (WH / LITRO)	POTENCIA/PESO (W/KG)	NÚMERO DE CICLOS	EFICIENCIA ENERGÉTICA-%
Zebra (NaNiCl)	125	300		1000	92.5
Polímero de litio	200	300	>3000	1000	90
Iones de litio	125	270	1800	1000	90
Níquel-Hidruro Metálico (NiMH)	70	140-300	250-1000	1350	70
Níquel Cadmio (NiCd)	60	50-150	150	1350	72.5
Plomo-ácido	40	60-75	150	500	82.5

Figura 1.4: Características.

El litio es uno de los metales más ligeros, tiene una gran capacidad electroquímica y la mayor capacidad de energía por unidad de peso. Las batería recargables con litio, puede dar una extraordinaria densidad de energía. [R28]

Centrándonos en el funcionamiento de las baterías de litio las cuales usan un cátodo (electrodo positivo), un ánodo (electrodo negativo) y un electrolito, al igual que el resto de baterías. El cátodo es el metal de litio en oxidación y en ánodo es carbón poroso. [R28]

Durante la descarga, los iones fluyen desde el ando hasta el cátodo, por el medio electrolito, durante la carga la dirección es la contraria, pasando los iones del catado al ánodo. [R28]

#### 1.4.1.4. Tipos de baterías

Normalmente y para obtener mayores beneficios las baterías de Litio no se fabrican del mismo material, siendo numerosos los materiales con los que se mezcla. A continuación se muestra una tabla (Tabla 1.5) con las características más importantes. [R28]

	LI-COBALT LICO <sub>2</sub> (LCO)	LI-MANGANESE LIMN <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (LMO)	LI-PHOSPHATE LIFEPO <sub>4</sub> (LFP)	NMC LINiMnCO <sub>2</sub>
<b>Voltaje</b>	3.60 V	3.80 V	3.30 V	3.60/3.70 V
<b>Limita de carga</b>	4.20 V	4.20 V	3.60 V	4.20 V
<b>Ciclos de vida</b>	500 – 1,000	500 – 1,000	1,000 – 2,000	1,000 – 2,000
<b>temperatura de funcionamiento</b>	Medio	Medio	Buena	Buena
<b>Energía específica</b>	150 – 190 Wh/kg	100 – 135 Wh/kg	90 – 120 Wh/kg	140 - 180 Wh/kg
<b>Temp. Máxima</b>	150 °C - (302 °F)	250 °C - (482 °F)	270 °C - (518 °F)	210 °C - (410 °F)
<b>Fecha de fabricación</b>	1994	1996	1999	2003
<b>Fabricantes</b>	Sony, Sanyo, GS Yuasa, LG Chem, Samsung, Hitachi, Toshiba	Hitachi, Samsung, Sanyo, GS Yuasa, LG Chem, Toshiba, Moli Energy, NEC	A123, Valence, GS Yuasa, BYD, JCI/Saft, Lishen	Sony, Sanyo, LG Chem, GS Yuasa, Hitachi, Samsung
<b>Otra información</b>	Alta energía específica, baja potencia, móviles portátiles...	Alta potencia, buena energía específica. Medicas, coches eléctricos, herramientas	Alta descarga	Herramientas, medicina, coches eléctricos

Figura 1.5: Características. [R28]

#### 1.4.1.5. Mantenimiento de las baterías

Alargar la vida de la batería del equipo es una preocupación que todos tenemos en mente, no solo por ahorrar, sino para disponer de energía suficiente cuando estemos alejados de un enchufe. Para mantener nuestra batería bien conservada se puede hacer lo siguiente: [R27]

- Utilizar siempre el cargador propio de la batería y no otros cargadores similares. Siempre debe ser el soportado, puesto que otro cargador similar podrá cargar la batería pero si no

respetar la constante de carga la batería se estropea, por lo que es importante asegurarse de que el cargador suministra la corriente adecuada. Un cargador con demasiado amperaje puede incluso incendiar la batería. [R27]

- Cargar la batería a temperatura ambiente es una buena práctica, por eso no es conveniente cargar la batería mientras hacemos uso de ella, ya que la temperatura del equipo elevará la temperatura de la batería. Apaga el dispositivo siempre que puedas para cargar la batería. [R27]
- Retira el cargador una vez esté cargada al máximo. [R27]
- No expongas la batería a cargas demasiado prolongadas. [R27]
- Haga un uso eficiente de la energía y utilice modos de ahorro cuando sea posible. Así ahorrará ciclos de carga y descarga y por tanto, alargará la vida útil. [R27]
- No dejes que la batería se descargue por debajo de un cierto porcentaje. Evita por todos los medios agotarla del todo y cárgala cuando su porcentaje esté por debajo del 15%. [R27]
- La buena refrigeración de la batería es vital, mantén la batería alejada de puntos calientes o, si es necesario, añade un sistema de refrigeración extra. Normalmente el conjunto de baterías emplea un termistor o sensor de temperatura que la comprueba periódicamente. [R27]
- Muchos sistemas operativos tienen una opción o software para recalibrar la batería, hágalo. Así el aprovechamiento y gestión por parte del SO será mejor. [R27]
- Si no va a utilizar la batería durante un largo periodo de tiempo, se recomienda dejar una carga de 40 o 50 % antes de guardarla, siempre evitando mantenerlas con carga completa durante largos periodos de tiempo. [R27]
- Las baterías de litio no necesitan una carga prolongada antes del primer uso, es un mito que viene heredado de las antiguas baterías de níquel que si lo necesitaban. También es un mito que necesiten estar descargadas al 0 % para recargarlas, precisamente es aconsejable todo lo contrario. [R27]

#### 1.4.2. Sistema de monitoreo de baterías (BMS)

Conforme el tiempo avanza y la tecnología continúa evolucionando, es más evidente la necesidad de construir equipos electrónicos cada vez mas pequeños, que sean portátiles y de una alta autonomía, debido a esto es que las baterías han ido tomando importancia, de hecho, son una

parte indispensable para el funcionamiento de los aparatos portátiles y la evolución de estas mismas inició en paralelo con los mismos dispositivos portátiles.

Por esto, es que en nuestros tiempos las baterías de ion-litio se hicieron un espacio en el mercado y se han vuelto indispensables en nuestro mundo actual para diferentes aplicaciones.

Hoy en día se utilizan las baterías de ion-litio, en la mayoría si no es que en todos los dispositivos portátiles, ya que son una alternativa eficiente y de un tamaño pequeño, es por esto que en el mercado las baterías de litio presentan un gran crecimiento a lo largo de los años.

Sin embargo, en muchas aplicaciones se emplean voltajes elevados a los que normalmente entrega una sola celda de ion-litio, de aquí la necesidad de hacer arreglos con las baterías ya sea en serie o en paralelo, así como mixtos.

Un dato a tener en cuenta de las baterías es el hecho de que no existen dos baterías exactamente iguales, esto debido al mismo proceso de fabricación de las celdas, por esto cada una de las celdas se carga y se descarga de forma diferente y de hecho por esto mismo al realizar un arreglo en serie se corre el riesgo de sobrecargar o sobre descargar alguna de las celdas, generando daños a las celdas y afectando el desempeño de las mismas así como sus ciclos de carga.

Existen daños causados por sobrecargar las celdas, como lo son el aumento en la temperatura y la generación de partículas de litio, las cuales pueden ocasionar cortos circuitos dentro de la celda, de igual forma, si aumenta la temperatura por encima del rango permitido, puede ocurrir una explosión de la celda de litio.

A pesar de las ventajas y cualidades que posee la batería de litio, la misma tiene inconvenientes, los cuales son mantenerlas dentro de su rango de operación, un rango en el cual sea seguro emplearlas para evitar daños en las celdas, disminución en su vida o prevenir en el peor de los casos una explosión, debido a todos estos inconvenientes es necesario adicionar circuitos de protección para controlar la carga y descarga de las celdas, un ejemplo de este tipo de circuitos son los sistemas de monitoreo de baterías (BMS).

El BMS se encarga de monitorear las variables de interés y de mayor importancia para proteger las baterías como lo son el voltaje, corriente y temperatura de cada una de las celdas y a partir de la información procura que la batería se encuentre en su rango de operación seguro y de esta forma permite aprovechar la batería al máximo, cuidando su vida útil y previniendo sobrecarga y sobre descarga.

**El diseño del BMS de este proyecto está centrado en la implementación de un gestor de carga-descarga para baterías de ion-litio 18650, con un voltaje nominal de 3,7 [V] y una capacidad de 2000 [mAh], en un arreglo de conexión en serie y paralelo. A partir del sensado de voltaje, temperatura y corriente, se buscará mantener las**

**baterías dentro de su rango de operación mediante la implementación de circuitos de igualación y de control.**

Aunque las baterías de litio pueden llegar a explotar por un mal uso, son seguras siempre que se respeten los límites de voltaje, corriente y temperatura, estas baterías requieren un bajo mantenimiento y se puede considerar que no tienen efecto de memoria, así mismo la auto descarga es mucho menor que la presentada con otras tecnologías de baterías, otro factor es el voltaje nominal de 3.7 [V] el cual es empleado en una gran variedad de dispositivos electrónicos.

Un gran inconveniente es el hecho de necesitar electrónica de protección, la afectación del rendimiento con la edad, su restricción en transporte debido a su posible explosión y el costo elevado de fabricación de las celdas en comparación con otro tipo de baterías.

En realidad, una batería de litio es un paquete que contiene una o varias celdas, el paquete se presenta en variedad de formas y tamaños (debido al arreglo y la capacidad de cada paquete), en general un paquete de baterías de litio contiene todos o algunos de los siguientes elementos: [R29]

- Uno o varios sensores de temperatura para medir y controlar la temperatura del banco de batería.
- Un sensor de voltaje y un circuito regulador que mantiene los niveles seguros de voltaje y corriente.
- Algunos poseen un conector de comunicación.
- Un monitor de estado de carga de la batería, que corresponde a un pequeño ordenador encargado de administrar todo el proceso de carga para asegurar que las baterías se carguen lo más rápido y completamente posible.

Al igual que la mayoría de las baterías, las celdas de ion-litio poseen una cubierta externa de metal, la cual tiene un escape, es decir una salida que es sensible a la presión, la cual es importante debido a que la batería se encuentra presurizada y si la batería se calienta demasiado se corre el riesgo de explosión por sobrepresión lo cual se mitiga gracias al escape que libera la presión, esta es una medida de seguridad que aunque en muchos casos es útil, en otros no es suficiente para evitar que la batería explote.

Esta cubierta de metal contiene una espiral larga que comprende tres láminas delgadas las cuales son:

1. Electrodo positivo: Fabricado con óxido de litio cobalto, o  $\text{LiCoO}_2$ .

2. Electrodo negativo: Fabricado de carbono.
3. Separador: Es una lámina muy fina de plástico micro perforado, como su nombre lo indica, separa los electrodos positivos y negativos pero permite que los iones viajen entre electrodos.

Adicionalmente, dentro de la cubierta las láminas están sumergidas en un electrolito.

Las baterías de ion-litio funcionan bajo el proceso denominado inserción y desinserción, las reacciones que ocurren en el interior de las baterías son en estado sólido, entre dos compuestos, uno denominado huésped de naturaleza iónica, que reacciona ocupando lugares libres y otro compuesto denominado anfitrión. [R30]

En las baterías de ion-litio, el electrodo negativo está compuesto del metal litio y el electrodo positivo está formado por un comportamiento de anfitrión, comúnmente usado el carbono, permitiendo la inserción de los iones de litio, cuando la batería se carga, los iones de litio se mueven a través del electrolito desde el cátodo hasta el ánodo y se fijan al carbono. [R30]

Por todo lo anterior y el hecho de que las baterías de litio requieren electrónica que las proteja es que se implementan circuitos como lo son el BMS, el cual se conecta al banco de baterías y sus funciones esenciales son:

1. Desconectar o apagar la carga cuando la tensión de una celda de la batería cae por debajo de 2,5V.
2. Detener el proceso de carga cuando la tensión de una celda de la batería sube por encima de 4,2V.
3. Apagar el sistema cada vez que la temperatura de una celda exceda los 50°C.
4. Además de equilibrar las celdas, un BMS:
  - a) Evitará la subtensión en las celdas desconectando la carga cuando sea necesario.
  - b) Evitará la sobretensión en las celdas reduciendo la corriente de carga o deteniendo el proceso de carga.
  - c) Desconectará el sistema en caso de sobrecalentamiento.

**Por lo tanto, un BMS es indispensable para evitar que se produzcan daños en banco de baterías de gran tamaño. El BMS diseñado para este proyecto es un sistema de administración de baterías que es un circuito capaz de monitorear un paquete de baterías para que funcionen en los parámetros seguros de operación (voltaje, corriente y temperatura) durante su carga y descarga.**

Estos circuitos siguen el estado de cada una de las baterías, es decir, conectan o desconectan si el paquete de baterías se encuentra fuera de los parámetros seguros de operación además de equilibrar o igualar el voltaje, dependiendo de la aplicación, es importante especificar cada uno de los bloques necesarios para diseñar un BMS.

En este caso se implementaron las siguientes funciones (objetivos generales de un BMS)

- Protección de las celdas
  - Esta función del BMS se ocupa de la protección de las baterías para evitar inconvenientes en la carga y descarga, que puedan llegar a afectar su vida útil causando incluso algún daño permanente. Lograr este objetivo representa una desventaja a nivel de costos económicos respecto a otros tipos de batería, sobre todo en industrias donde se utilizan baterías de gran potencia.
- Control de carga
  - Es una de las características más importantes debido a que entre las causas más comunes de daño de baterías se encuentra un inapropiado proceso de carga.
- Balance de voltaje en las celdas
  - En un paquete de baterías, la diferencia de voltaje entre celdas se debe a la impedancia interna de cada una de estas o a condiciones de operación diferente; esta diferencia tiende a aumentar en cada ciclo de carga o descarga y las celdas más propensas a daños pueden fallar con más facilidad, es por esta razón que la igualación de voltaje entre celdas (en un arreglo) surge como una necesidad para compensar estas celdas con la ecualización de carga en toda la cadena de baterías, extendiendo así su vida útil.

**El objetivo planteado es diseñar e implementar un circuito que permita el funcionamiento de un conjunto de baterías de ion-litio conectadas en un arreglo serie-paralelo dentro de los rangos de operación de voltaje y temperatura para obtener un voltaje nominal de salida de 48V.**

### 1.4.3. Cargador

Un cargador es un aparato que sirve para recargar una batería descargada haciendo circular un voltaje en corriente directa ligeramente superior a la de la misma batería (el estado de carga de una batería se puede controlar fácilmente con un densímetro: aquella disminuye con el peso específico de la solución electrolítica).

Desde el momento en que la fuente de energía de la que se dispone es la red de corriente alterna, se recurre a rectificadores, que permiten el paso de la corriente en un solo sentido, dado que la tensión de la red tiene un valor notablemente superior al necesario, en algunos casos se hace uso de un transformador para reducir la tensión al valor de operación, igualmente se pueden emplear fuentes conmutadas controladas para disminuir la tensión (esto en el caso de estudio a 48 [V] nominales y 56 [V] en carga completa).

Para conseguir una carga completa hay que limitar la intensidad de corriente; una carga excesivamente rápida provoca una elevación de temperatura lo que causa una reducción en la vida útil de la batería, de aquí la necesidad de un control de corriente que permita dosificar la intensidad suministrada. [R31]

Existen tipos de cargadores de batería mucho más complejos, con variadas características de potencia y de funcionamiento. Dado que la duración de la carga no debe ser excesiva, hay que controlar tanto el tiempo como la intensidad de la corriente y el peso específico de la solución electrolítica. [R31]

Para reducir la necesidad vigilar las baterías durante su carga, los cargadores actuales tienen el funcionamiento de interrumpirse automáticamente en cuanto se ha alcanzado la carga completa. Prácticamente no son más que dispositivos sensibles a la tensión en los bornes de la batería, que actúan de forma que en cuanto se alcanza la tensión correspondiente a la carga máxima el cargador de batería queda inactivado automáticamente. [R31]

Actualmente en el mercado existen diversos tipos de cargadores con diferentes características, los cuales dan solución a diferentes tipos de necesidades como lo son la carga, recuperación, mantenimiento y arranque de baterías.

Para el diseño o selección de un cargador es necesario conocer la batería a cargar, a continuación se mencionan estos parámetros a tener en cuenta.

1. Como determinar la potencia del Cargador

Las baterías usualmente marcan los Amperios Hora, que se utilizan para determinar que cargador se precisa utilizar o diseñar.

2. Voltage de operación de la BATERÍA.

3. Capacidad de corriente (en Amperes) que puede suministrar la batería de forma instantánea.

4. Tipo de batería: LIQUIDAS, GEL, AGM

Adicionalmente a estos parámetros, también es importante tener en cuenta las curvas de carga de cada tipo de batería ya que de estas se puede obtener información del comportamiento y la vida que tendrá la batería, a continuación se muestran unas gráficas del tipo de carga que se pueden generar pero para baterías de plomo a 12 [V], estas mismas se pueden aplicar a las baterías de litio .

### Curva W – 1 etapa

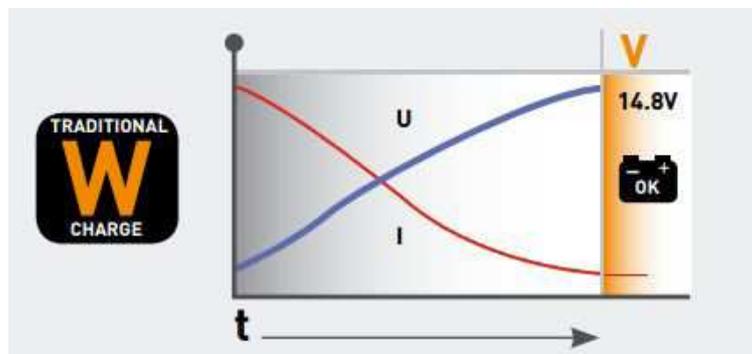


Figura 1.6: Curva W – 1 etapa [R20].

1. A medida que la tensión (V) de la batería aumenta la intensidad de carga disminuye (I).

### Curva WoW – 2 Etapas

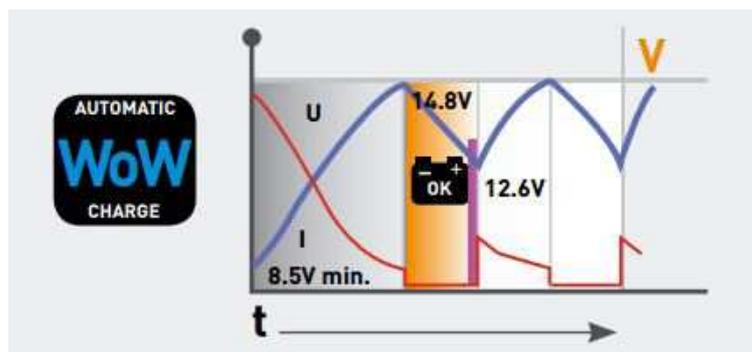


Figura 1.7: Curva WoW – 2 Etapas [R20].

1. Inicialmente carga tipo W.
2. Una vez la batería llega a 14,8V el cargador se detiene.

Si la tensión de la batería está por debajo de los 12,6V, se vuelve al paso 1.

#### Curva WoW Gel – 2 etapas

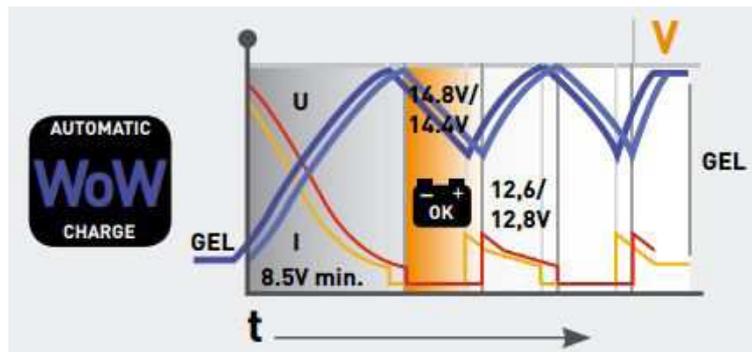


Figura 1.8: Curva WoW – 2 Etapas [R20].

1. Inicialmente carga tipo W.
2. Una vez la batería llega a 14,8V (LIQUIDA) o 14,4V (GEL), el cargador se detiene.

Si la tensión de la batería está por debajo de los 12,6V (LIQUID) o 12,8V (GEL), se vuelve al paso 1.

#### Curva IU – 4 etapas con mantenimiento

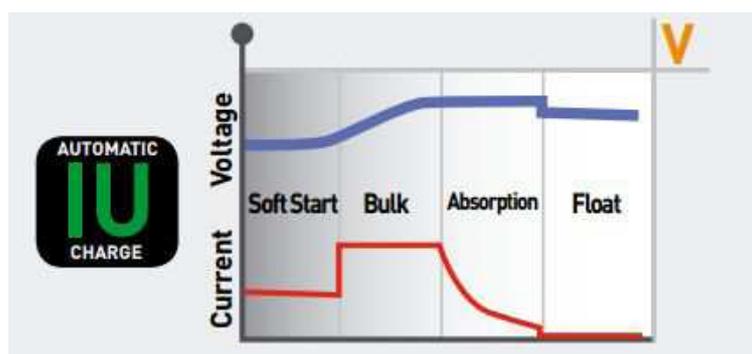


Figura 1.9: Curva IU – 4 etapas con mantenimiento [R20].

1. Mediante una carga inicial lenta, se realiza test de recuperación de la batería hasta que esta llega a los 10V.

2. Carga a intensidad constante hasta que la tensión de la batería alcanza los 14,8V (LIQUID) o 14,4V (GEL).
3. La intensidad de carga disminuye gradualmente para conseguir una carga al 100 %.
4. Entra el modo de mantenimiento aplicando una tensión constante de 13,8V manteniendo la batería siempre al 100 %.

#### Curva IUOU – 5 etapas con mantenimiento pulsado

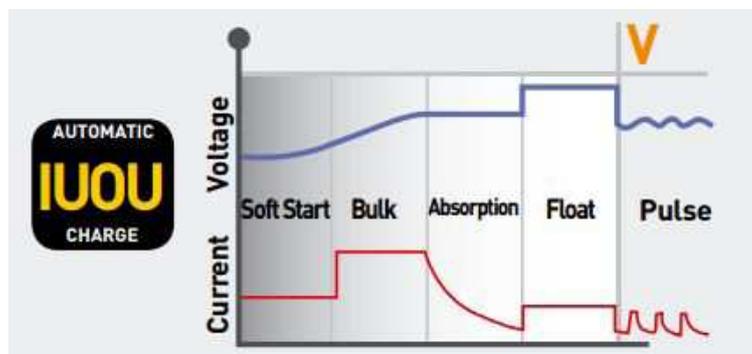


Figura 1.10: Curva IUOU – 5 etapas con mantenimiento pulsado[R20].

1. Mediante una carga inicial lenta, se realiza un test/recuperación de la batería hasta que esta llega a los 10V.
2. Carga a intensidad constante hasta que la tensión de la batería alcanza los 14,8V (LIQUID) o 14,4V (GEL).
3. La intensidad de carga disminuye gradualmente para conseguir una carga al 100 %.
4. En caso de baterías de ciclo profundo, el cargador suministra una mayor tensión (15,5V) a baja intensidad (menos de 2A) y durante un tiempo limitado (2h) con la finalidad de conseguir cargas completas.
5. Entra el modo de mantenimiento aplicando una pulsación con la batería entre el 80 % al 100 % de su capacidad, permitiendo tener el cargador conectado indefinidamente manteniendo la batería en perfecto estado.

#### 1.4.4. Motores

Los motores son artefactos cuyo propósito principal es brindar energía a un conjunto de piezas para que estas tengan un funcionamiento y una máquina pueda realizar sus actividades, normalmente, estos funcionan con algún tipo de combustible. [R32].

Hoy en día, el motor es una de las invenciones más utilizadas, pues, la mayoría de los objetos que el ser humano ha creado necesita ese impulso que lo haga funcionar [R32].

#### 1.4.4.1. Motores tipo geared hub

El motor de este tipo está incorporado dentro de la rueda (Figura 1.11), su principio de funcionamiento es el siguiente:

- Se tiene un imán exterior en forma de anillo llamado estator y un núcleo metálico llamado rotor.
- Dicho rotor cuenta con un eje en el centro, el cual estará sujeto a la bicicleta, mientras que el estator estará sujeto a la rueda, y será el impulsor de esta máquina.

A continuación se en listan algunos de los motores en hub existentes en el mercado actual.

#### ST2's SYNO Drive motor (TDCM) (STROMER)

El ST2 SYNO Drive se trata de un motor brushless de corriente directa, el cual se monta en el cubo de la llanta trasera de la bicicleta. Se puede apreciar este motor en la Figura 1.11.



Figura 1.11: Motor tipo geared hub modelo ST2's SYNO Drive Motor [R11].

- Potencia: 500 [Watts]
- Par máximo: 40 [Nm]
- Velocidad máxima de asistencia: 45 [km/h]

**Bionx PL 250 M (BionX)**

El Bionx PL 250 M es un motor en hub como se puede observar en la Figura 1.12 el cual cuenta con un sistema regenerativo de frenado con una eficiencia de 15 %.



Figura 1.12: Motor tipo geared hub modelo Bionx PL 250 M [R12].

- Potencia: 250 [Watts]
- Autonomía: 65 [km]
- Par máximo: 25 [Nm]
- Peso: 7.3 [kg]

**Dapu 123 RN (DAPU)**

Figura 1.13: Motor tipo Dapu 123 RN [R13].

El Dapu M123 RN, mostrado en la parte de arriba en la Figura 1.13 es un motor en hub con las siguientes características.

- Potencia: 200/250 [Watts]
- Par máximo: 30 [Nm]
- Velocidad máxima de asistencia: 25-32 [km/h]
- Peso: 2.8 [kg]

#### 1.4.4.2. Motor tipo mid-drive

Esta clase de motores se encuentran montados en el centro de la bicicleta, donde usualmente están los pedales. El posicionamiento otorga al ciclista una buena estabilidad y balance (Figura 1.14).

A continuación se presentan algunos de los motores del tipo mid-drive de uso comercial.

#### Impulse Evo (KAHLKOFF)

En la Figura 1.14 se puede observar el motor creado por la marca KALKHOFF llamado Impulse Evo.



Figura 1.14: Motor tipo mid-drive modelo Impulse EVO [R14].

Dentro de las características del mismo se tiene un par máximo de 100 Nm, con una asistencia de hasta 45 km/h. Utiliza un sensor de cadencia para poder controlar la asistencia que se le da

al ciclista. Está diseñado para ser utilizado con banda en la transmisión de potencia, con esta configuración se necesitan cambios de velocidad internos en el motor, los cuales están presentes en el Impulse Evo.

### Bosch (BOSCH)

Bosch cuenta con cuatro motores distintos dependiendo del perfil del ciclista. La Figura 1.15 muestra el motor Performance CX con sus accesorios, la batería y la consola montable.



Figura 1.15: Conjunto de motor, baterías e indicador marca Bosch tipo mid-drive modelo Performance Line [R15].

Esta marca cuenta con 4 motores distintos dependiendo del perfil del ciclista.

Cada uno de los cuatro motores se adecúa al uso que se le vaya a dar a la bicicleta, ya sea aportando más potencia o acomodándose al tipo de cambios de velocidad que se tengan presentes o el par de fuerza que se necesite.

El cuadro 1.1 muestra la tabla de especificaciones para cada uno de los cuatro motores de Bosch como viene en la página de internet de la marca. El peso para cada uno de los motores es menor a los 4 kilogramos.

El motor Performance Line CX está diseñado para ser utilizado con un sistema de cambios por un desviador y aporta asistencia hasta los 25 km/h con una potencia máxima de 250 Watts, presenta niveles de asistencia de 50, 120, 210 y 300 por ciento de asistencia con un par de fuerza en el nivel más alto de 70 Nm y en el más bajo de 40 Nm, el sistema permite dar dos vueltas a los pedales por segundo como máximo.

Para el motor Performance Line Speed se puede utilizar un sistema de cambios de velocidad por desviador ofreciendo asistencia para una velocidad de hasta 45 km/h con una potencia máxima de 350 Watts, los niveles de asistencia son de 55, 120, 190 y 275 por ciento con un par de fuerza máximo y mínimo de 63 Nm y 40 Nm, respectivamente.

	Performance Line CX 25 km/h	Performance Line Speed 45 km/h	Performance Line Cruise 25 km/h		Active Line Cruise 25 km/h	
<b>Gear type</b>	Derailleur system	Derailleur system	Derailleur system	Hub gear system	Derailleur system	Hub gear system
<b>Power</b>	250 watts	350 watts	250 watts	250 watts	250 watts	250 watts
<b>Support level (%)</b>	TURBO: 300 SPORT: 210 TOUR: 120 ECO: 50	TURBO: 275 SPORT: 190 TOUR: 120 ECO: 55	TURBO: 275 SPORT: 190 TOUR: 120 ECO: 50	TURBO: 260 SPORT: 170 TOUR: 110 ECO: 50	TURBO: 250 SPORT: 150 TOUR: 100 ECO: 40	TURBO: 225 SPORT: 150 TOUR: 100 ECO: 40
<b>Maximal possible drive torque (Nm) (converted to a gear ratio of 1:1 crankset to chainring)</b>	TURBO: 75 SPORT: 60 TOUR: 50 ECO: 40	TURBO: 63 SPORT: 55 TOUR: 50 ECO: 40	TURBO: 63 SPORT: 55 TOUR: 50 ECO: 40	TURBO: 50 SPORT: 50 TOUR: 45 ECO: 40	TURBO: 50 SPORT: 45 TOUR: 40 ECO: 35	TURBO: 48 SPORT: 45 TOUR: 40 ECO: 35
<b>Maximum cadence (rpm) with drive support</b>	TURBO: 120 SPORT: 120 TOUR: 120 ECO: 120	TURBO: 100 SPORT: 100 TOUR: 100 ECO: 90	TURBO: 100 SPORT: 100 TOUR: 100 ECO: 90			
<b>Start-up behavior</b>	Very sporty	Sporty	Sporty	Dynamic	Harmonious	Harmonious
<b>Max. support up to</b>	25 km/h	45 km/h	25 km/h	25 km/h	25 km/h	25 km/h
<b>Backpedal function</b>	no	no	no	no	no	optional
<b>Gear shift detection</b>	yes (dynamic)	yes	yes	no	yes	no
<b>Weight</b>	< 4.0 kg	< 4.0 kg	< 4.0 kg	< 4.0 kg	< 4.0 kg	< 4.0 kg

Cuadro 1.1: Cuadro comparativo de distintos motores Bosch [R15].

Los dos últimos motores, el Performance Line Cruise y el Active Line Cruise, presentan características muy similares, teniendo el primero niveles de asistencia mayores. Ambos motores ofrecen una potencia máxima de 250 Watts con una velocidad de asistencia máxima de 25 km/h y admiten sistemas de cambio de velocidades con desviador o en hub. El par de fuerza máximo para estas configuraciones se encuentra dentro del rango de 48 Nm a 63 Nm y el mínimo dentro de un rango de 35 Nm a 40 Nm.

**Yamaha PW Series (YAMAHA)**

La marca Yamaha (Figura 1.16) ofrece un motor del tipo mid-drive dentro de su serie PW. Las características de dicho motor son:



Figura 1.16: Motor tipo mid-drive modelo Yamaha PW Series [R16].

- Velocidad máxima de asistencia: 25 [km/h]
- Potencia: 250 [Watts]
- Par máximo: 80 [Nm]
- Peso: 3.5 [kg] Dapu

**MD250 (DAPU)**

Figura 1.17: Motor tipo mi-drive modelo Dapu MD250 [R17].

La marca hindú Dapu también ofrece un motor con configuración mid-drive, este se muestra en la Figura 1.17, cuyas características son:

- Potencia: 250/350 [Watts]
- Par máximo: 95 [Nm]
- Velocidad máxima de asistencia: 25-32 [km/h]
- Peso: <5.5 [kg]

### **Vivax Assist (VIVAX)**

Se trata de un motor con la posibilidad de montarse dentro del poste del asiento. Es un motor capaz de aportar 200 Watts de potencia con un peso de 1.8 kg, se trata de un motor con la posibilidad de montarse dentro del poste (Figura 1.18).



Figura 1.18: Vivax Assist acoplado al eje de los pedales [R18].

Es un motor capaz de aportar 200 Watts de potencia con un peso de 1.8 kg. El funcionamiento del motor es tal que este es capaz de aportar una asistencia al ciclista sin prevenir el óptimo funcionamiento del sistema cuando se encuentra apagado y la potencia de la bicicleta proviene únicamente de las piernas del usuario.

Para poder instalarlo es necesario tener un diámetro interior de tubo mínimo de 31.66 mm. El tamaño de dicho motor permite instalarlo de manera que no sea accesible al usuario común al encontrarse oculto dentro del poste del asiento.

También se encuentra aislado de la intemperie, tanto el motor como el cople entre el eje de los pedales y el motor. Esto previene el tener que dar constante mantenimiento al sistema, aunque no se libra por completo de chequeos y servicios de cuidado.

Se han dado casos en los que ciclistas profesionales hacen uso de este tipo de motores para brindarles una ventaja injusta en competencia, debido a que por las dimensiones del motor es posible montarlo sin modificar notoriamente el diseño original de sus vehículos. Es con el uso de cámaras infrarrojas que se han detectado dichos dispositivos [R19].

#### 1.4.4.3. Ventajas y desventajas de ambos motores

##### Ventajas del motor tipo mid-drive

- El motor mid-drive es mucho mejor para subir colinas.
- El peso se distribuye de mejor manera en un motor mid-drive, pues se encuentra en el centro, a diferencia de un motor tipo hub, el cual se ubica dentro de la rueda, por lo que todo su peso recae sobre esa rueda.
- El motor tipo mid-drive puede continuar utilizando los cambios traseros de la bicicleta, de manera que el ciclista decida cuál es la relación más conveniente, si se encuentra en una colina puede escoger una relación que otorgue torque mientras que si circula en plano, puede escoger una relación que prefiera velocidad. Asimismo, si se utilizan los cambios traseros de una bicicleta, se puede optar por un motor más pequeño con el que aproveche mejor su rendimiento.
- Con un motor tipo hub, resulta más complicado cambiar la cámara dentro de la llanta.

##### Ventajas del motor tipo hub

- En cuanto a precios, un motor tipo mid-drive es mucho más caro que uno tipo hub.
- Los motores mid-drive más sencillos pueden resultar más ruidosos que los tipo hub.
- Las cadenas y las catarinas se desgastan mucho más en un motor tipo mid-drive, pues están sometidas a mayores esfuerzos en todo momento.
- Los motores tipo mid-drive tienen la posibilidad de presentar una falla antes que los motores tipo hub, porque cuentan con muchas más partes móviles, además de aquellos espacios por los que se puedan ensuciar.

### 1.4.5. Controlador

El controlador es la parte del sistema que permite activar los motores con los cuales se mueven cada uno de los vehículos, determinan cuánta electricidad pasa de la batería al motor regulando su correcto funcionamiento, hoy en día la mayoría de los motores de DC son sin escobillas y necesitan un controlador para hacer girar el motor.

En el mercado actual existen diferentes tipos de controladores, que trabajan a diferentes voltajes, potencias, fases, entre muchos otros parámetros, este sistema electrónico se puede considerar como uno de los más importantes en los sistemas de movilidad ya que sin ellos el motor no es capaz de accionarse y el usuario tampoco tiene control sobre el motor, es por esto la importancia de un controlador.

En la industria existen diversos motores, como lo son los de directa, alterna, en múltiples fases, cada motor tiene una aplicación en específico, así también los controladores que permiten dar un accionamiento a los motores dependiendo del uso que se le dará, se puede resumir a que el controlador es el encargado de dar la velocidad al motor controlando el voltaje y la corriente que se le suministra, se pueden considerar como variadores de velocidad.

Una gran parte de los equipos utilizados en la industria moderna funcionan a velocidades variables, como por ejemplo los trenes laminadores, los mecanismos de elevación, las máquinas-herramientas, etc. En los mismos se requiere un control de velocidad para lograr una adecuada productividad, una buena terminación del producto elaborado, o garantizar la seguridad de personas y bienes. [R33]

El estudio de este fenómeno para cada caso particular tiene una gran importancia práctica, ya que la elección correcta de las características de los motores y variadores a instalar para un servicio determinado, requieren el conocimiento de las particularidades de éste producto. [R33]

La regulación de velocidad puede realizarse por métodos mecánicos, como poleas o engranajes, o por medios eléctricos. [R33]

La máquina de inducción alimentada con corriente C.A., especialmente la que utiliza un rotor en jaula de ardilla, es el motor eléctrico más común en todo tipo de aplicaciones industriales y el que abarca un margen de potencias mayor. Pero no basta conectar un motor a la red para utilizarlo correctamente, sino que existen diversos elementos que contribuyen a garantizar un funcionamiento seguro. [R33]

La fase de arranque merece una especial atención. El par debe ser el necesario para mover la carga con una aceleración adecuada hasta que se alcanza la velocidad de funcionamiento en régimen permanente, procurando que no aparezcan problemas eléctricos o mecánicos capaces de perjudicar al motor, a la instalación eléctrica o a los elementos que hay que mover. [R33]

El motor de corriente alterna, a pesar de ser un motor robusto, de poco mantenimiento, liviano e ideal para la mayoría de las aplicaciones industriales, tiene el inconveniente de ser un motor rígido en cuanto a su velocidad. La velocidad del motor asincrónico depende de la forma constructiva del motor y de la frecuencia de alimentación. Como la frecuencia de alimentación que entregan las Compañías de electricidad es constante, la velocidad de los motores asincrónicos es constante, salvo que se varíe el número de polos, el resbalamiento o la frecuencia. [R33]

El método más eficiente de controlar la velocidad de un motor eléctrico es por medio de un variador electrónico ya sea de frecuencia en el caso de que sea de en alterna o de voltaje en caso de que sea de directa. [R33]

**En nuestro caso el controlador que se fabricará será para un motor brushless de tres fases, en el cual se realiza una conversión de corriente directa a una a una variación de frecuencia y voltaje es decir controlando tanto la amplitud como las fases, el controlador por lo tanto realiza dos acciones una es la de variar la frecuencia y la otra es regular el voltaje aplicado al motor, logrando modificar así su velocidad, una condición que debe cumplirse en el controlador es que simultáneamente con el cambio de frecuencia, debe variarse el voltaje aplicado al motor esto principalmente para evitar la saturación del flujo magnético con una elevación de la corriente la cual puede llegar a dañar el motor.**

Algunos factores a tener en cuenta a la hora de diseñar un sistema de regulación de velocidad, no solo para el caso evaluado si no para cualquier tipo de control de velocidad, pensando en una producción del mismo.

1. Límites de regulación.
2. Progresividad o flexibilidad de regulación.
3. Rentabilidad económica.
4. Estabilidad de funcionamiento a una velocidad dada.
5. Sentido de la regulación (aumento o disminución con respecto a la velocidad nominal).
6. Carga admisible a las diferentes velocidades.
7. Tipo de carga (par constante, potencia constante, etcétera).
8. Condiciones de arranque y frenado.
9. Condiciones ambientales (temperatura, humedad, etc.)
10. Tipo de motor (potencia, corriente, voltaje, etc.).

11. Rangos de funcionamiento (velocidad máxima.,velocidad mínima)
12. Aplicación monomotor o multimotor.
13. Consideraciones de la red (microinterrupciones, fluctuaciones de tensión, armónicas, factor de potencia, corriente de línea disponible).

**Hay mucho de qué hablar acerca de los controladores ya que por sí solo es un tema muy amplio, por lo que solo se dan las características más generales del mismo y dentro del trabajo de tesis se irán abordando algunos otros encontrados al momento de diseñar e implementar un controlador diseñado y no comprado, por lo que se tratarán temas que normalmente no se dicen acerca de los controladores ya que es un desarrollo implementado y no únicamente una implementación de tecnología ajena a nosotros.**

## Capítulo 2

# Introducción

Previamente a este trabajo se ha realizado investigación, desarrollo e implementación de electrónica en diversos sistemas de movilidad como lo son autos eléctricos prototipo, scooters, máquinas de diferentes potencias, así como también en motores de diferentes características, además del desarrollo de múltiples proyectos en diversas disciplinas y con características de diseño y manufactura variadas.

Este trabajo de tesis estará principalmente enfocado en el desarrollo de la electrónica necesaria para los vehículos eléctricos, se abordarán los desarrollos e implementaciones más relevantes para este trabajo, así como las conclusiones a las que se han llegado.

Este trabajo se enfocará en el desarrollo electrónico de un controlador, un BMS y un cargador, los cuales son necesarios para todos los vehículos eléctricos, se construirán y dará una de los problemas encontrados, así como la forma que se siguió para conseguir realizar este tipo de sistemas, en capítulos siguientes se hablará a más detalle de cada uno de los desarrollos y el impacto principal que tiene en el trabajo.

Un punto importante a resaltar de este trabajo, es que no es únicamente un trabajo de investigación, sino también es un trabajo de implementación, llevando los sistemas electrónicos desarrollados a la práctica, colocándolos en vehículos que permitan realizar pruebas cercanas a la realidad, por lo que adicionalmente a los sistemas electrónicos en los cuales se enfoca este trabajo, también se diseñarán y construirán vehículos sobre los cuales se puedan realizar estas pruebas.

## 2.1. Definición del problema

El problema consiste en investigar, diseñar, construir e implementar la electrónica necesaria para que un vehículo eléctrico funcione y pueda ser usado, así como también el profundizar en la electrónica de los vehículos eléctricos (tema principal a tratar en este trabajo), así como también se puedan dar propuestas de configuraciones y diseños, para así lograr diseñar, construir e implementar la electrónica de un vehículo y hacerlo funcionar con la misma.

Debido a la complejidad y el tamaño del trabajo realizado, es recomendable dividir el problema en secciones a resolver, abordando principalmente el tema electrónico de los vehículos, para esto se propone hacer la división en problema mecánico y problema electrónico.

Para cada uno de estos dos problemas es necesario dos etapas fundamentales las cuales son el diseño y la manufactura, excluyendo la etapa de pruebas que para nuestro caso es un conjunto de las dos.

Este trabajo estará principalmente enfocado en el desarrollo de la electrónica que requieren los vehículos eléctricos para funcionar, es decir un controlador para accionar un motor, un BMS (Sistema de Monitoreo de Baterías) para baterías de litio 18650, y un cargador para baterías de litio, así como también el tratar de llegar a realizar una implementación de estos sistemas en vehículos construidos para este fin, y no dejar los resultados en una prueba de laboratorio.

Como el principal objetivo de este trabajo es la electrónica, el problema mecánico pasa a segundo plano, no obstante también es importante ya que para obtener información más cercana a la realidad el implementar un sistema que permita experimentar fabricado a nuestra necesidad es de vital importancia, por lo que aunque el problema mecánico no es de gran relevancia en este tema de tesis, es importante para su implementación por lo que se hablará de él a grandes rasgos, es decir sin profundizar en los problemas encontrados, mostrando un poco del proceso y los resultados.

Para realizar pruebas a las partes principales de las cuales está constituido un vehículo eléctrico, es necesario realizar la manufactura de algunos prototipos en diferentes escalas, para esto se decide apoyarse en otros proyectos que se están realizando en paralelo a este trabajo de tesis, estos son dos vehículos uno urbano y otro prototipo los cuales participarán en la formula Shell Eco Marathon en la categoría eléctrica.

En cambio, el problema electrónico que es el tema principal de este trabajo y por ende es el que se realizará con más detalle, se observa que es posible reducirlo en tres sistemas principales que son el BMS, controlador y cargador, ya que son los elementos principales de los cuales está constituido un vehículo eléctrico que emplea baterías de litio.

Conforme avance el trabajo, se irá especificando con más detalles los problemas en los cuales se subdividió este trabajo, una forma de dividirlo a grandes rasgos es la siguiente:

#### 1. Trabajo de Tesis

- Diseño electrónico
  - BMS.
  - Cargador.
  - Controlador.
- Manufactura electrónica
  - BMS.
  - Cargador.
  - Controlador.
- Mecánica
  - Diseño
    - Auto Prototipo.
    - Auto Urbano.
  - Manufactura
    - Auto Prototipo.
    - Auto Urbano.
- Validación
  - Validación de la electrónica en el laboratorio.
  - Validación de la electrónica sobre el vehículo Prototipo.
  - Validación de la electrónica sobre el vehículo Urbano.

Como se muestra en la división anterior, el trabajo de tesis queda dividido y enfocado principalmente en el diseño y manufactura de la electrónica, pero no excluyendo la parte mecánica ya que sobre los vehículos que se construyan, se realizara la implementación de la electrónica desarrollada en este trabajo.

Un punto importante a mencionar, es que en este trabajo de tesis como se dijo está enfocado en el diseño, fabricación y validación de la electrónica que requiere un auto eléctrico para funcionar, pero también se construirán varios vehículos para realizar pruebas del desarrollo electrónico, en la construcción de los vehículos participaron diferentes personas, ya que con este trabajo de tesis e creo el equipo DZEC de la Facultad de Ingeniería, el cual participa en la formula Shell Eco Marathon, de aquí es donde se distribuyen las actividades a realizar, debido a que este trabajo se realizó en dos años, han participado alrededor de 20 personas en la fabricación, donde a grandes rasgos las actividades principales que realizó el autor de esta tesis fueron las siguientes:

1. Diseño del chasis del auto de pruebas del vehículo prototipo.
2. Diseño del auto prototipo Kalani V1 para la competencia Shell Eco Marathon.
3. Diseño del auto urbano Mictlán para la competencia Shell Eco Marathon.
4. Diseño de los moldes para el auto prototipo Kalani V1.
5. Diseño de los moldes para el auto urbano Mictlán.
6. Diseño del chasis del vehículo prototipo Kalani V1.
7. Diseño del chasis del vehículo urbano Mictlán.
8. Análisis estructural del vehículo urbano Mictlán y del vehículo prototipo Kalani V1.
9. Análisis de ergonomía del vehículo urbano Mictlán y del vehículo prototipo Kalani V1.
10. Organización de actividades del equipo DZEC.
11. Capacitación de los integrantes del equipo DZEC para trabajar la fibra de vidrio.
12. Capacitación de los integrantes del equipo DZEC para fabricar un chasis de vehículo.
13. Capacitación de los integrantes del equipo DZEC en SolidWorks.
14. Capacitación de los integrantes del equipo DZEC en electrónica básica.
15. Capacitación de los integrantes del equipo DZEC en carrocerías de vehículos.
16. Capacitación de los integrantes del equipo DZEC en pintura y manufactura general, uso de torno, fresadora, taladro y procesos de manufactura.
17. Manufactura del chasis del auto de pruebas del vehículo prototipo.
18. Manufactura del chasis del auto prototipo Kalani V1.
19. Manufactura del chasis del auto urbano Mictlán.
20. Manufactura de moldes para el vehículo prototipo Kalani V1.
21. Manufactura de moldes para el vehículo urbano Mictlán.
22. Manufactura de la carrocería del vehículo urbano Mictlán y vehículo prototipo Kalani V1.
23. Reclutamiento de nuevos integrantes.
24. Búsqueda de recursos para financiar el proyecto.
25. Encargado de medios y comunicación del proyecto.
26. Capitán del equipo DZEC.

27. Fundador del equipo DZEC para la formula Shell Eco Marathon.
28. Piloto del vehículo urbano Mictlán.
29. Patrocinador del equipo.
30. Diseñador del controlador para el vehículo prototipo Kalani V1.
31. Diseñador del controlador para el vehículo urbano Mictlán.
32. Diseñador del BMS y del cargador.
33. Fabricante de los controladores para los vehículos, así como del BMS y el cargador.
34. Validación de los controladores, cargador y BMS.
35. Implementación de los controladores, BMS y cargador.
36. Administrador de recursos monetarios.
37. Evaluación de los integrantes y seguimiento de actividades.
38. Compras para los vehículos, electrónica, uniformes, materiales y vuelos.
39. Pintura, lijado, corte de carrocería para el vehículo prototipo Kalani V1.
40. Pintura, lijado, corte de carrocería para el vehículo urbano Mictlán.
41. Diseño y manufactura de la dirección de los vehículos urbano y prototipo V1.
42. Validación del trabajo realizado por los integrantes del equipo.
43. Diseño de la computadora para el vehículo urbano Mictlán.
44. Manufactura de la computadora para el vehículo urbano Mictlán.
45. Programación de algoritmos de eficiencia para el vehículo prototipo Kalani V1.
46. Programación de algoritmos de eficiencia para el vehículo urbano Mictlán.
47. Diseño de sistema de telemetría para medir eficiencia en vehículos eléctricos.
48. Manufactura de un sistema de telemetría para medir eficiencia en vehículos eléctricos.
49. Programación de interfaz para el sistema de telemetría el cual mide eficiencia en vehículos eléctricos.
50. Diseñador de experimentos para evaluar electrónica de potencia (controlador).
51. Diseñador de experimentos para evaluar BMS y cargador de baterías de litio.

## 2.2. Objetivo y Metas

### 2.2.1. Objetivo

Diseñar, construir, evaluar e implementar en dos vehículos eléctricos un controlador para motores brushless de tres fases a un voltaje de 48[V], un BMS para baterías de litio a un voltaje de operación de 48[V] y un cargador para un paquete de baterías de litio a 48[V].

### 2.2.2. Metas

- Diseñar un Controlador para motores brushless de tres fases a 48 [V].
- Construir un Controlador para motores brushless de tres fases a 48 [V].
- Evaluar en el laboratorio un Controlador para motores brushless de tres fases a 48 [V].
- Diseñar un BMS para baterías de litio a 48 [V].
- Construir un BMS para baterías de litio a 48 [V].
- Evaluar en el laboratorio un BMS para baterías de litio a 48 [V].
- Diseñar un Cargador para baterías de litio a 48 [V].
- Construir un Cargador para baterías de litio a 48 [V].
- Evaluar en el laboratorio un Cargador para baterías de litio a 48 [V].
- Implementar un Controlador para motores brushless de tres fases a 48 [V] en un vehículo prototipo eléctrico.
- Implementar un Controlador para motores brushless de tres fases a 48 [V] en un vehículo urbano eléctrico.
- Implementar un BMS para baterías de litio a 48 [V] en un vehículo prototipo eléctrico.
- Implementar un BMS para baterías de litio a 48 [V] en un vehículo urbano eléctrico.
- Implementar un Cargador para baterías de litio a 48 [V] en un vehículo prototipo eléctrico.
- Implementar un Cargador para baterías de litio a 48 [V] en un vehículo urbano eléctrico.

### 2.3. Justificación

Hoy en día los vehículos eléctricos son cada vez más comunes en nuestro día a día, pero no solo los vehículos eléctricos como automóviles o camiones de transporte público, si no también en otro tipo de sistemas de movilidad como lo son la bicicleta, el scooter entre muchos otros que van saliendo como el caso del vehículo última milla.

Por esto y la necesidad existente actualmente, es importante el realizar desarrollos que estén ligados a lo que es la movilidad, no solo por el hecho de que en nuestros días es una necesidad presente, sino también porque el desarrollo, investigación e implementación de tecnología así como el conocimiento adquirido de la misma, es de gran importancia para tener la facilidad de realizar cambios a la medida así como el resolver problemas de esta índole sin la necesidad de depender de agentes externos.

Aunque claro que, el tener el conocimiento y la tecnología propia es una gran ventaja, no es la única ya que la formación de recursos humanos capaces de desarrollar y entender las necesidades de este tipo de sistemas también es otro punto a favor del porque realizar este tipo de trabajos, que no solamente se quedan en la teoría en el laboratorio, si no que se lleven a la práctica, dan un panorama más amplio y real del problema al que el profesionista se enfrenta.

## Capítulo 3

# Diseño y manufactura del sistema Mecánico

En este capítulo se habla de manera general sobre el trabajo realizado, adicional al necesario para cumplir los objetivos de este trabajo de tesis.

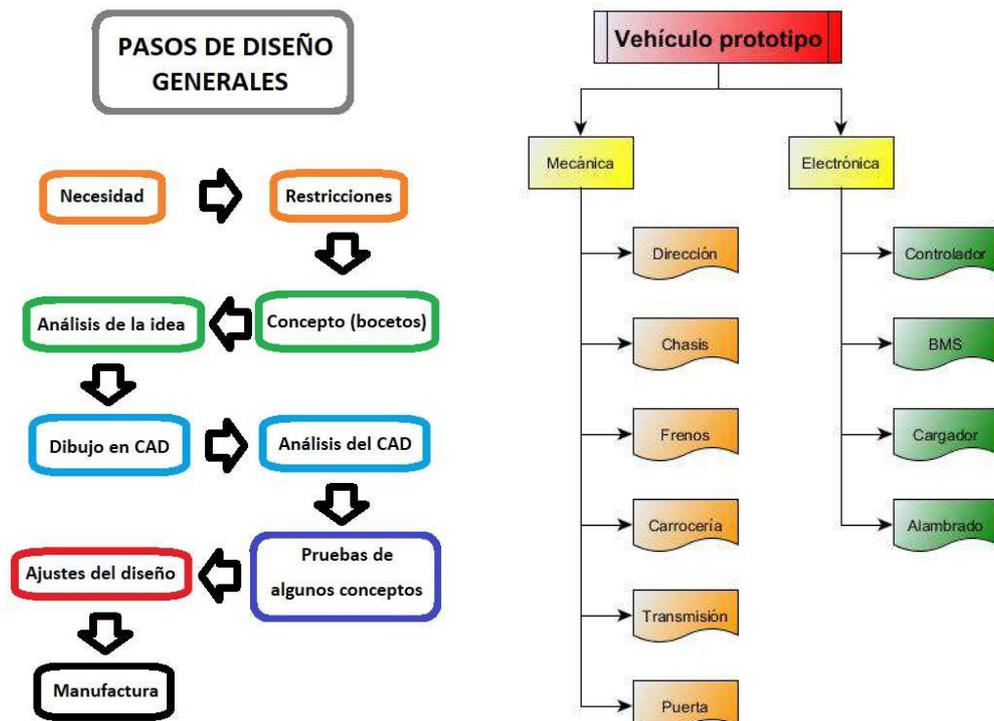
Se desarrollaron varios proyectos en paralelo (diferentes vehículos) a este trabajo de tesis debido a la necesidad de tener sistemas en los cuales realizar pruebas más realistas, los cuales también requieren un proceso de diseño, manufactura y pruebas, dado que este trabajo no está enfocado en el diseño y manufactura de los vehículos, solo se describirán a grandes rasgos las etapas que se siguieron para lograr desarrollar cada uno, sin profundizar en los problemas encontrados, las soluciones que se dieron ni en por qué los tipos de materiales que se eligieron para desarrollar cada proyecto.

Este capítulo se realizó con la finalidad de mostrar los sistemas sobre los cuales se realizarán las pruebas, con el fin de obtener resultados que se acerque más a la realidad y no queden en un concepto de laboratorio o en experimentos controlados.

Adicionalmente, estos vehículos son los empleados para la formula Shell de reciente creación en la Facultad de Ingeniería, la cual se generó a partir de este trabajo de tesis, por lo que, aunque el diseño de todos los vehículos presentados y organización del proyecto fue realizado por el autor de esta tesis, existen más personas que estuvieron involucradas en la manufactura de estos vehículos, los cuales fueron estudiantes interesados en este tipo de proyectos.

### 3.1. Vehículo prototipo

El primer proyecto a resolver es un vehículo prototipo, el cual participó en la competencia de Shell Eco Mathon del 2017 en Sao paulo Brasil y el 2018 en San Francisco California Estados Unidos. En la Figura 3.1a se muestra los pasos de diseño generales seguidos para llevar a cabo el proyecto del vehículo prototipo.



(a) Pasos de diseño del vehículo prototipo.

(b) Diagrama general de subsistemas del vehículo Prototipo.

Figura 3.1

Dentro de la etapa de diseño, nos basamos inicialmente en una idea, para el prototipo planteamos desarrollar tres vehículos de este tipo, el primero nos permitirá hacer pruebas de concepto, donde podamos realizar pruebas de sistemas, ya sea electrónica, dirección o sistemas de fijación, el segundo es un vehículo de tres ruedas completamente funcional, donde se resolvieron problemas de proceso, manufactura y electrónica, además de que será el primer vehículo que irá a la competencia, y el tercero con la experiencia adquirida, será el producto final del cual se basará el urbano, además la parte electrónica de este vehículo es la base para los demás vehículos desarrollados, así como también del software de control interno del controlador.

Como se muestra en el diagrama general del proceso de diseño del vehículo, se inicia con una idea, en este caso con bocetos, de los cuales se desarrolla la idea a trabajar, además debido a que un vehículo está constituido de varios subsistemas y para facilitar el desarrollo del proyecto se realiza un diagrama general del vehículo, este desglose se muestra en la Figura 3.1b.

### 3.1.1. Diseño de la versión de prueba (vehículo 1)

Teniendo el diagrama lo siguiente que se resolvió fue el dimensionamiento del vehículo, debido a que es un vehículo que competirá en la formula Shell Eco Marathon, el diseño está restringido a lo que diga el reglamento de esta temporada (Temporada 2018), teniendo esto en cuenta se plantea la idea general del vehículo sobre una serie de bocetos, el boceto final se muestran en la Figura 3.2.

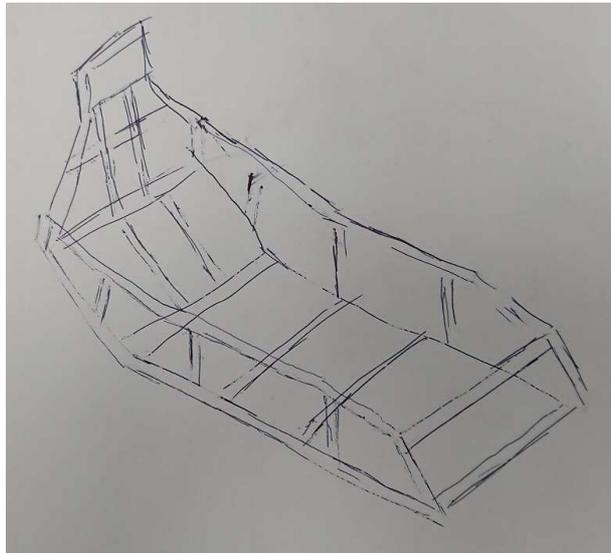


Figura 3.2: Bocetos del chasis de prueba.

Después de haber analizado la estructura general del chasis, se procedió a realizar el dibujo en CAD (el dibujo se realizó en SolidWorks) de este chasis, en donde podremos realizar un análisis más completo del chasis de pruebas, de este CAD, se obtiene la cantidad de material que se emplea para su fabricación, así como un peso aproximado y la resistencia de esta estructura, este CAD se muestra en la Figura 3.3.

El material elegido para esta versión fue perfil cuadrado de acero, por la facilidad de trabajar este material y el costo del mismo, así como también, el dimensionamiento del chasis es meramente para dar una idea y tomar como punto de partida y de ahí ir optimizando el diseño.

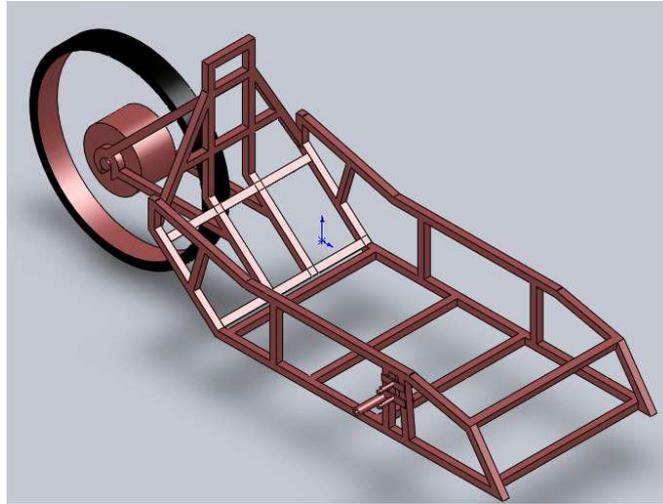


Figura 3.3: Chasis de prueba en CAD.

Con este primer concepto de chasis, se trabaja en el desarrollo de una idea para la carrocería del vehículo y al igual que con el chasis, partimos de bocetos e ideas que plasmamos en papel, después de varios diseños realizados se decidió trabajar en el diseño mostrado en la Figura 3.4, también se muestran algunos diseños de pintura propuestos por una integrante del equipo.

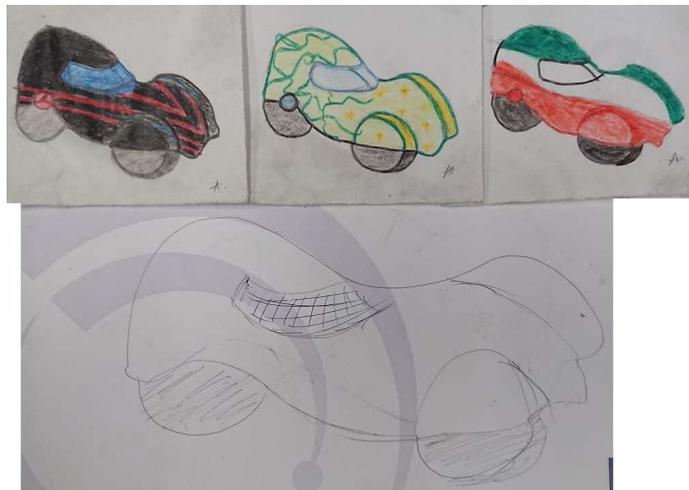
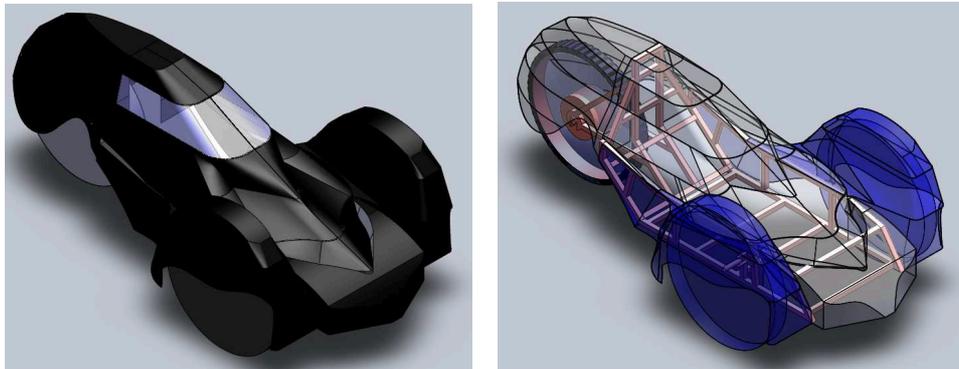


Figura 3.4: Boceto a trabajar de la carrocería del primer vehículo prototipo.

Con el boceto definido, se procedió a realizar el dibujo en CAD (el dibujo se realizó den Solid-Works) el cual permite manipular la idea para analizar la forma en que se sujetará el chasis a

la carrocería, así como también el peso estimado del vehículo, el paso del cableado, la dirección y el sistema de frenado, este diseño se muestra en la Figura 3.5a.



(a) CAD del primer vehículo prototipo.

(b) Ensamble de carrocería y chasis del primer vehículo prototipo.

Figura 3.5: CAD del vehículo

Con los dos diseños realizados en CAD se procedió a unirlos en un ensamble como se muestra en la Figura 3.5b, en este ensamble resolvemos el problema de sujeción y unión de las dos partes (chasis y carrocería) antes de fabricarlos, así como también permite tener un modelo para presentar ante patrocinadores llamado Render.

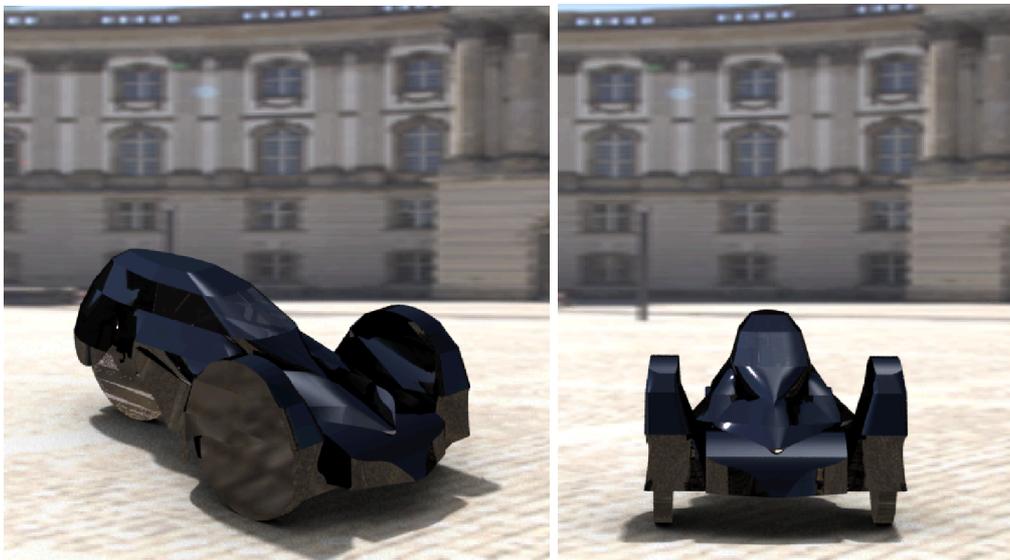


Figura 3.6: Render del vehículo prototipo de prueba.

Como se mencionó ya resueltos los problemas de unión entre el la carrocería y el chasis, procedemos a realizar un render del vehículo completo, esto con el objetivo de promover el proyecto y financiar su fabricación, este render se muestra en la Figura 3.6.

Teniendo un presupuesto inicial de alrededor de 10,000 pesos mexicanos, se procede a la fabricación de esta primera versión del vehículo prototipo. Para la manufactura de la carrocería se procede al diseño de los moldes, en esta primera versión se decide realizar una división del vehículo y trabajar varios moldes por separado, dicha división se muestra en la Figura 3.7, donde se observa que el auto está constituido de seis piezas pero solo fabricaremos cinco moldes para la carrocería del vehículo.

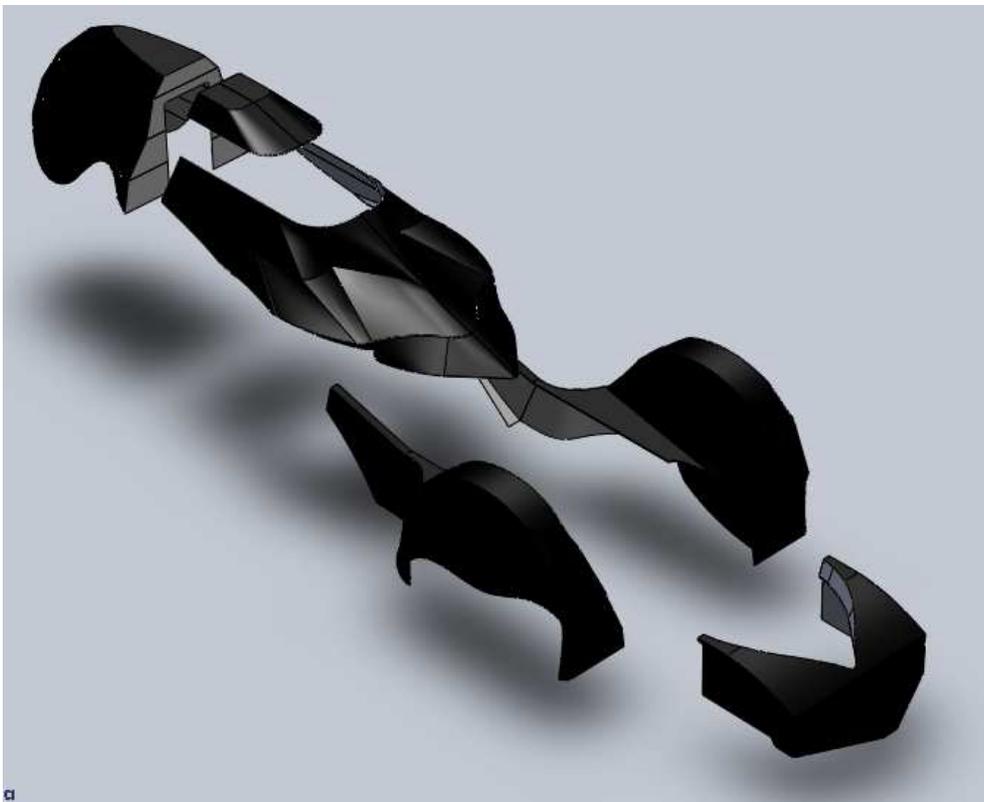
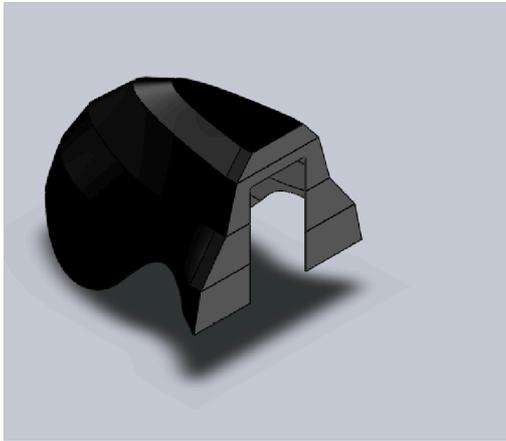
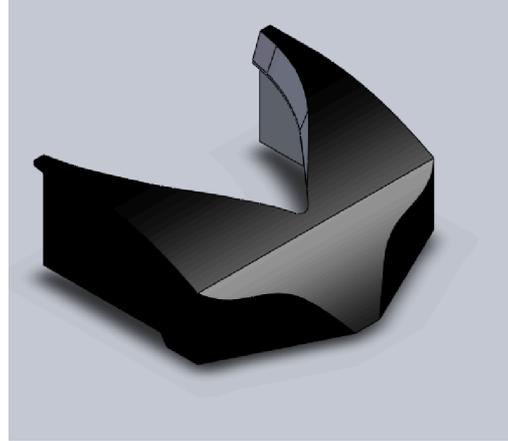


Figura 3.7: Piezas de la carrocería dividida para los moldes.

Iniciamos nombrando a cada una de las piezas para realizar el ensamblado de cada molde, esto se muestra en la Figura 3.8, ya con cada una de la piezas procedemos a realizar el diseño de los moldes como se muestra en la Figura 3.9, en donde analizamos tanto el material que emplearemos, el ensamble del mismos, así como el proceso de desmolde para obtener las piezas de la carrocería. El material para la fabricación de estos moldes por su bajo costo, se decidió emplear MDF con pegamento.



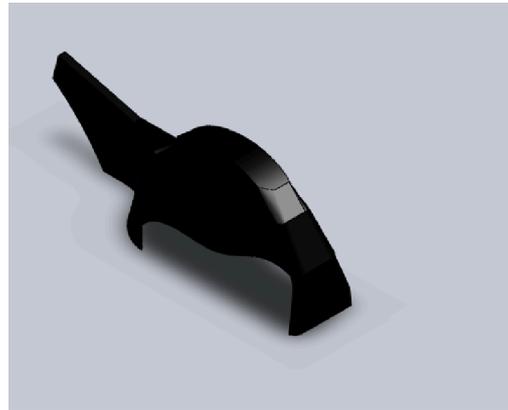
(a) Tapa trasera.



(b) Defensa.



(c) Salpicadera izquierda.



(d) Salpicadera derecha.



(e) Puerta.



(f) Toldo.

Figura 3.8: Piezas del vehículo prototipo de prueba.

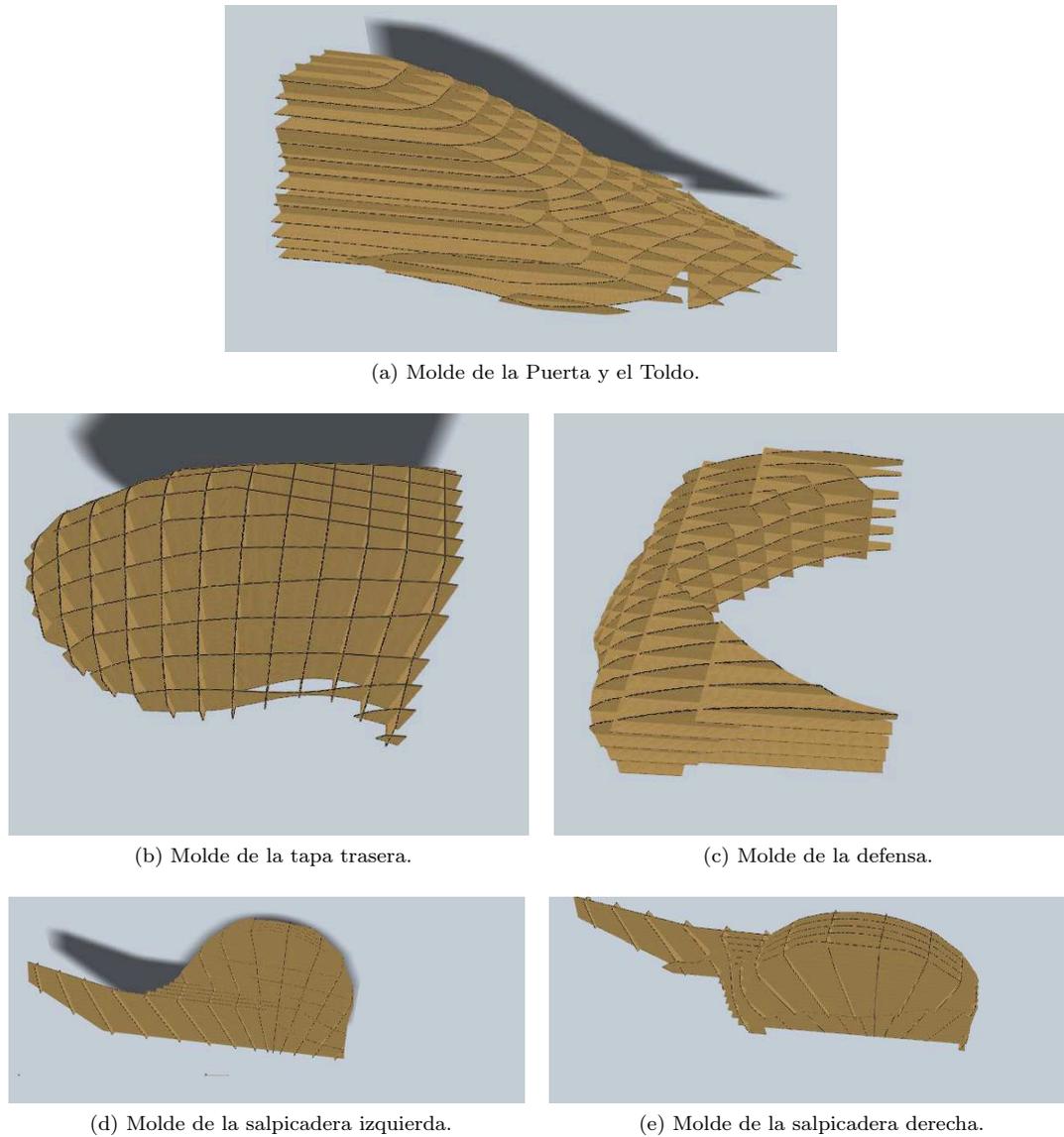


Figura 3.9: Moldes del vehículo prototipo de prueba.

### 3.1.2. Manufactura de la versión de prueba (vehículo 1)

En base al CAD del chasis y las medidas obtenidas del mismo se procede a la fabricación, para esto compramos el material que requerimos así como también lo cortamos y se procede a soldar, en la Figura 3.10a se muestra algunas fotos del proceso de manufactura del chasis, mientras que en la Figura 3.10b se muestra el chasis de prueba soldado.



(a) Manufactura del chasis de prueba.



(b) Chasis de pruebas soldado.

Figura 3.10

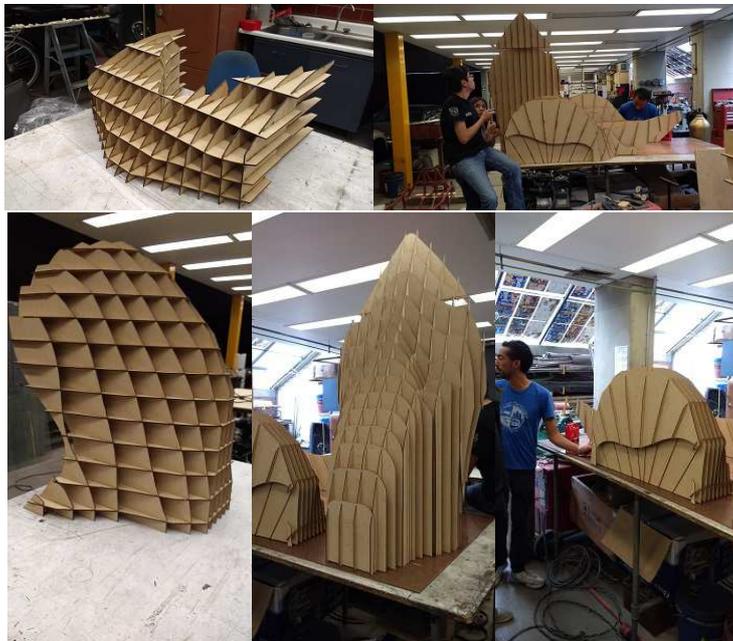


Figura 3.11: Moldes para la aborrecería armados.

También en base en los diseños realizados de los moldes, procedemos a su fabricación con los materiales definidos anteriormente, estos moldes después de su armado se muestran en la Figura 3.11.

Ya con los moldes fabricados, el siguiente paso que se realizó fue el llenado de los mismos, para esto se empleó espuma y se lijó siguiendo la forma del molde como se muestra en las imágenes presentes en la Figura 3.12, el material elegido para la carrocería por su costo, peso y fácil manipulación es la fibra de vidrio.



Figura 3.12: Moldes llenos de espuma y lijado de los mismos.



Figura 3.13: Moldes con pasta.

Con los moldes lijados y con la forma definida, se procede al acabado de cada molde, para esto se emplea pasta automotriz, en la Figura 3.13 se muestran algunos de estos moldes con la pasta

colocada, aunque los moldes en este punto ya se encuentran en la posibilidad de usarse para fabricar las piezas, es necesario realizar un acabado de los mismos lijando cada una de las piezas, esto para permitir un mejor acabado en la fibra de vidrio así como también facilitar el desmolde de la carrocería, en la Figura 3.14 se muestran los moldes lijados y listos para colocar la fibra de vidrio, en la Figura 3.15 se muestra el proceso completo realizado en un molde previo a la colocación de la fibra.



Figura 3.14: Moldes lijados.

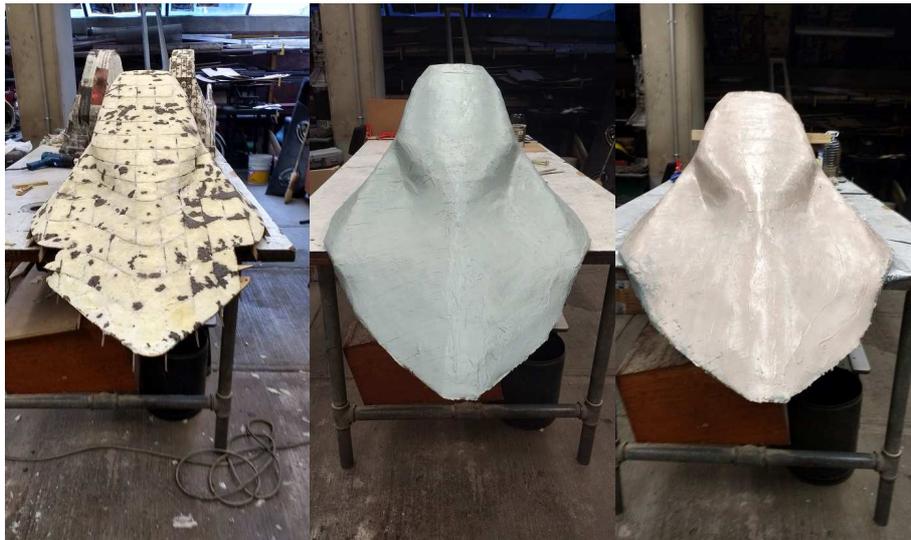


Figura 3.15: Proceso de los moldes.

Hemos mencionado con anterioridad el proceso de fabricación de los moldes, ya con los mismos terminados se procede a colocar la fibra de vidrio como se muestra en la Figura 3.16, es importante recalcar que el proceso que se está empleando en esta versión es el más económico encontrado hasta este momento, lo que nos afecta directamente en el peso de las piezas así como también en el acabado, pero debido al poco presupuesto con el que se inició este proyecto, fue la forma en que se logró sacar adelante el mismo.



Figura 3.16: Moldes con fibra de vidrio.

Con cada una de las piezas fabricadas sobre los moldes sin emplear vacío ni otro molde para hacer presión, se procede a desmoldar cada una de las piezas, en la Figura 3.17 se muestra este proceso en uno de los moldes (puerta y el toldo), donde ya se a retirado el toldo del molde, adicionalmente y por el proceso de manufactura elegido es necesario realizar el detallado de las piezas (el proceso se eligió por falta de recursos), lo primero es cortarlos a la medida definida en el CAD esto se muestra en la Figura 3.18, ya con los moldes cortados se empieza con el trabajo más laborioso resultado del proceso, el acabado de la carrocería, para esto se lija cada una de las piezas colocando pasta automotriz, tal y como se muestra en la Figura 3.19.



Figura 3.17: Desmoldado de las piezas.



Figura 3.18: Cortes de la carrocería.



Figura 3.19: Detallado de la carrocería.

Una vez lijadas y trabajadas las piezas, se procede a pintarlas para resaltar los detalles existentes en las mismas (Figura 3.20), además también durante el proceso de detallado es importante probar el sistema de sujeción sobre el chasis.



Figura 3.20: Pintado y detallado de la carrocería.

Mientras se trabaja en el acabado de la carrocería, en paralelo se trabaja en el chasis de pruebas, el cual requiere de una dirección, el alambrado, colocación de ruedas delanteras y trasera, frenos y todos los puntos de sujeción, en la Figura 3.21 se da una muestra parte de este trabajo.



Figura 3.21: Armado, alambrado y del vehículo prototipo de pruebas.

Con los detalles de las piezas mostrados después de la pintura, se continúa trabajando en el acabado de las mismas, esto se muestra en la Figura 3.22 donde se observan las piezas nuevamente lijadas después de su pintura base.

Posteriormente se vuelven a pintar las piezas para ver los detalles que falten estas piezas se muestran en la Figura 3.23 donde también se hace el ensamble físico sobre el chasis, en este punto estamos listos para dar el último acabado a la carrocería.



Figura 3.22: Lijado y acabado de la carrocería.



Figura 3.23: Colocación de la base en la carrocería.

Con el proceso anterior completado, se observan los detalles que faltan en la carrocería, en la Figura 3.24 se muestra como se coloca pasta solo en algunos puntos de las piezas, además del lijado final en las mismas esto con el fin de dar una vista aceptable del vehículo.

Ya con las piezas detalladas se procede a colocar la pintura de fondo del diseño del vehículo la cual para esta versión se eligió de color negro, tal y como se muestra en la Figura 3.25.



Figura 3.24: Detallado final de la carrocería.



Figura 3.25: Pintado del fondo en la carrocería.

Además para resaltar a nuestra cultura como a nuestro equipo de los demás equipos que participan en la competencia, se decidió que esta versión tuviera un diseño particular, el cual es un Quetzalcoatl que es colocado sobre la carrocería como se muestra en la Figura 3.26, además de eso el vehículo tiene un nombre muy particular el cual es **KALANI** que significa el sonido que hacen dos metales al chocar en Náhuatl.

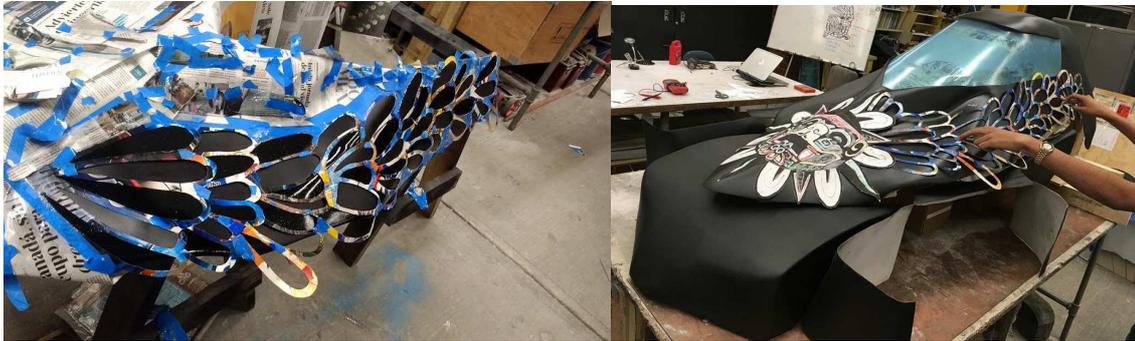


Figura 3.26: Pintado del diseño sobre la carrocería.

Con el diseño colocado en la carrocería del auto y para hacerlo resaltar se procede a dar un detallado a la pintura del diseño, tal y como se muestra en la Figura 3.27, todo el trabajo realizado hasta este momento es únicamente para la presentación en rueda de prensa, la cual se efectuó en las islas en rectoría de la Universidad Nacional Autónoma de México (Figura 3.28), esto con el fin de dar difusión del trabajo que se está realizando, los objetivos del equipo y hacia donde nos dirigimos como formula y como equipo, el cual es nombrado **DZEC**, cuyo significado es escorpión en Maya.



Figura 3.27: Detallado de la pintura.

Aunque en este punto el vehículo no está terminado es importante la difusión, no solo para dar a conocer nuestro trabajo, sino también para darnos a conocer y lograr obtener recursos, y así lograr continuar tanto con este vehículo como con nuevos desarrollos.



Figura 3.28: Presentación del vehículo ante medios 18/10/2017.

### 3.1.3. Diseño (vehículo 2)

Posteriormente a la rueda de prensa (a la difusión del proyecto), se procedió al diseño del vehículo que participará en la competencia de Shell Eco Marathon, tanto en Brasil (2017) como en Estados Unidos (2018).

Para este diseño tomamos como base lo aprendido en el vehículo de pruebas, no solo en el proceso de manufactura, sino también en las dimensiones, ergonomía, costos, trayectoria de alambrado y colocación de componentes, además después de lo visto en la rueda de prensa, se tomó la decisión de que para poder llegar a Brasil en el año de construcción de este vehículo, era necesario el idear una manera sencilla y económica de transportarlo por lo que se decidió que fuera modular, es decir que se pueda separar por secciones para así poderlo transportar en el avión, así como también se decidió que la carrocería estará unida en un único empaque, debido a los tiempos todo este proceso fue realizado en una semana, partiendo de un diseño previamente realizado en papel (Figura 3.29) y posteriormente cortado en secciones.

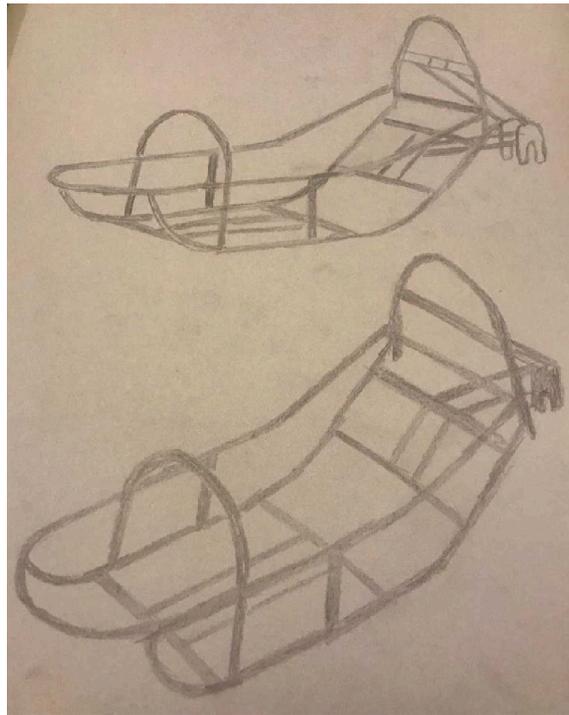


Figura 3.29: Bocetos del segundo chasis.

Al igual que en el diseño anterior partimos de una idea de chasis a fabricar, pero con un mayor entendimiento de la necesidad.

Con el diseño en papel y la necesidad presente de que el chasis se dividiera, se realizó un CAD (Figura 3.30), detallando lo más posible los elementos del cual estará constituido para así poder analizar la resistencia ya que este chasis a diferencia del primero será seccionado.

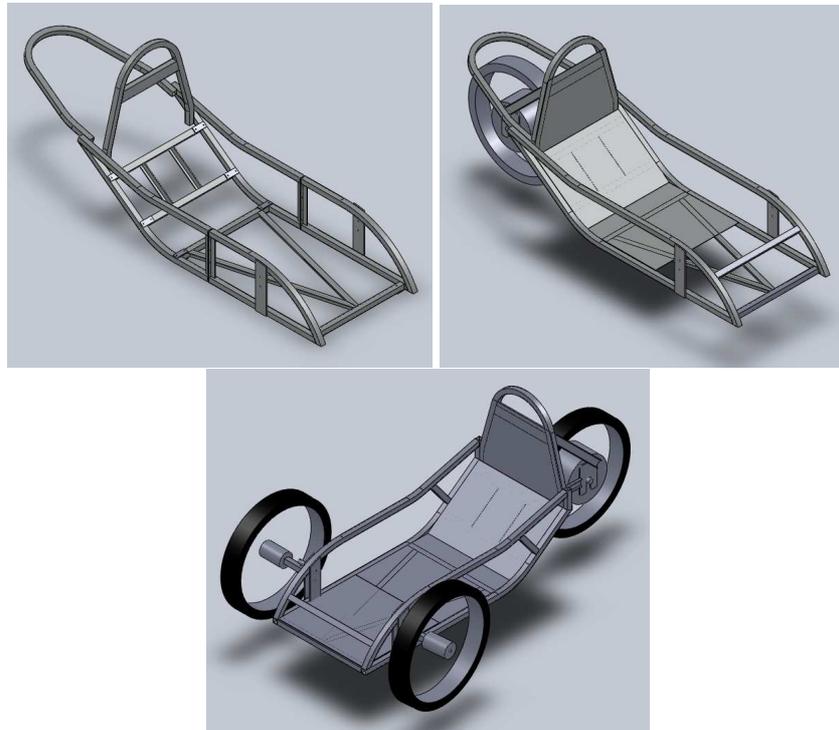


Figura 3.30: Segundo chasis en CAD.

Partiendo del CAD uno de los factores importante a tener en cuenta son los puntos de sujeción de la carrocería, los cuales ya se encuentran definidos en la versión anterior, y fueron considerados a la hora de dibujar la nueva versión.

La principal diferencia entre este chasis y el anterior es el peso, ya que el material que se está empleando es aluminio, lo que, además del cambio en el diseño, el material redujo el peso a más de la mitad.

#### 3.1.4. Manufactura (vehículo 2)

Con el diseño realizado en CAD y la verificación de cada una de las partes tanto en la unión como en el ensamble de la carrocería con el chasis, se prosigue a su manufactura la cual se muestra en la Figura 3.31, donde las piezas que requerían ser soldadas ya están presentes, se muestra el ensamble de la carrocería así como también la división del chasis en secciones.

El proceso de ensamblado se revisó previo a la competencia, debido a que el auto participaría en Brasil, lugar en el que no se contaba con herramientas ni presupuesto para problemas grandes, por lo que era de vital importancia asegurar que el chasis y la carrocería funcionaran como se habían planeado.



Figura 3.31: Ensamble del segundo chasis.

Ya con la seguridad de que el chasis funcionaría sin problemas, se llevó a Brasil lugar en el que fue armado sin ningún contratiempo, en la Figura 3.32 se muestra el ensamble de auto en la competencia que se llevó a cabo en Brasil.

Pero a diferencia del armado en el laboratorio, fue más lento debido a que no se contaba con suficiente herramienta, por lo que tomó alrededor de 12 horas el ensamblado de todo el vehículo.



Figura 3.32: Armado del chasis en Brasil 2017.

Con el auto armado entramos a la etapa más importante, la cual es la competencia, donde no solamente se evalúa la manufactura y el diseño del auto, si no también aspectos de seguridad así como también la electrónica y su funcionamiento, en la Figura 3.33 se muestra el auto durante la competencia, la cual es la primera en la que participa el equipo **DZEC**.



Figura 3.33: Competencia de Shell eco Marathon en Río de Janeiro Brasil 2017.

De esta competencia un factor importante a resaltar es que fue elegido entre los mejores diseños presentados en la competencia (Figura 3.34), tanto por su forma, temática y la estructura que conforma todo el vehículo.



Figura 3.34: Kalani entre los mejores diseños.

Posteriormente y después de unos ajustes en el peso, el auto fue llevado a la competencia de América que se llevó a cabo en California EU, cuyas imágenes se muestran en la Figura 3.35.

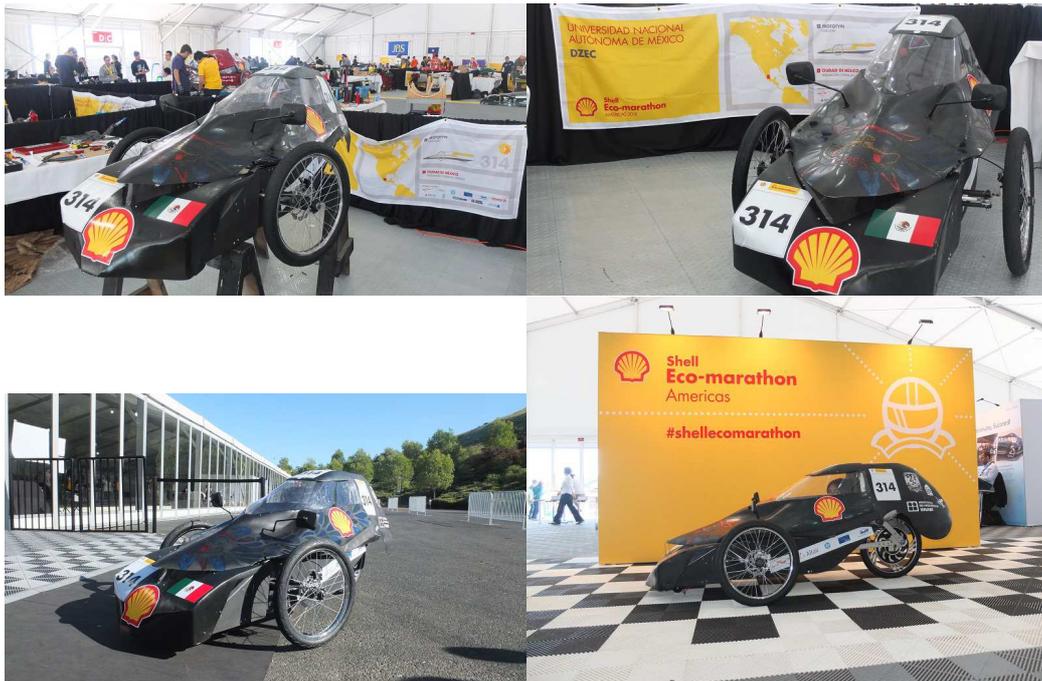


Figura 3.35: Competencia de Shell eco Marathon en San Francisco California EU 2018.

Al ser dos competencias en diferentes lugares, se trató qué diferentes integrantes se presentarán, no solo para obtener experiencia en lo que es la competencia si no también en los problemas y como solucionarlos ante la presión y el tiempo en contra.

En la primera competencia participaron seis miembros del equipo (cuatro mujeres y dos hombres) mientras que en la segunda competencia participaron 5 miembros (dos mujeres y tres hombres) (Figura 3.36).



Figura 3.36: Kalani con el equipo representativo EU.

Con el conocimiento adquirido hasta este punto es posible diseñar y fabricar un nuevo auto prototipo, pero por falta de tiempo y debido a que se planea que este auto compita a finales del 2019, la tesis lo dejará para un trabajo a futuro.

## 3.2. Vehículo Urbano

### 3.2.1. Diseño

El segundo proyecto a resolver es un vehículo urbano, este al igual que el vehículo prototipo participará en Shell Eco Marathon peso en el 2019 en San Francisco California EU.

Al igual que en el vehículo prototipo se seguirán los mismos pasos de diseño para llevar a cabo el proyecto del vehículo urbano (Figura 3.1a).

Como los pasos de diseño son los mismos que en vehículo prototipo, iniciamos basándonos en una idea del como queremos que luzca tanto el chasis como la carrocería del vehículo urbano, pero a diferencia del prototipo, para este caso únicamente se plantea desarrollar un único vehículo tomando como experiencia lo aprendido en el diseño y manufactura anterior.

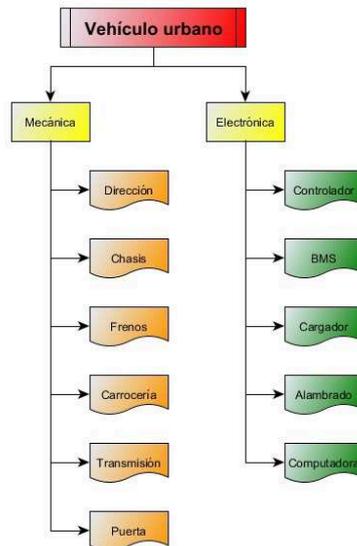


Figura 3.37: Diagrama general de subsistemas del vehículo Urbano.

Como se muestra en el diagrama del proceso general de diseño, el vehículo se inicia con una idea, la cual es planteada con bocetos de los cuales se desarrolla la idea a trabajar, además debido a que un vehículo está constituido de varios subsistemas y para facilitar el desarrollo del proyecto se realiza un diagrama general del vehículo, este desglose se muestra en la Figura 3.37, que a diferencia del vehículo prototipo este cuenta con más elementos ya que el concepto es diferente y de mayor complejidad.

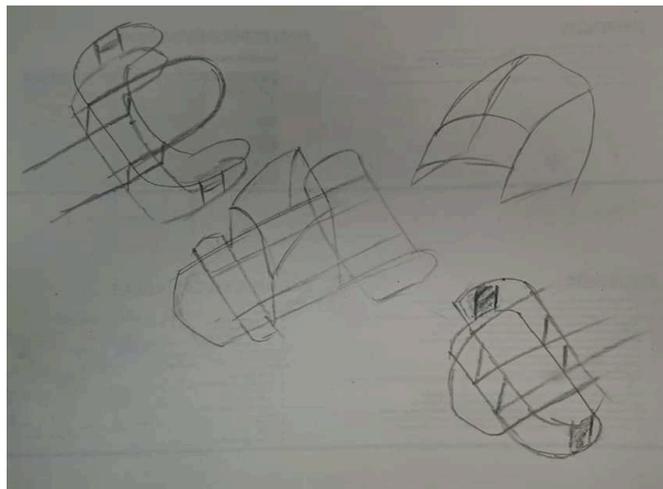


Figura 3.38: Boceto del chasis del vehículo Urbano.

Lo siguiente que se resolvió fue el dimensionamiento del vehículo, debido a que es un vehículo que competirá en la fórmula Shell Eco Marathon, el diseño está restringido a lo que diga el reglamento de esta temporada (Temporada 2019), teniendo esto en cuenta se plantea la idea general del vehículo sobre una serie de bocetos, el elegido se muestran en la Figura 3.38.

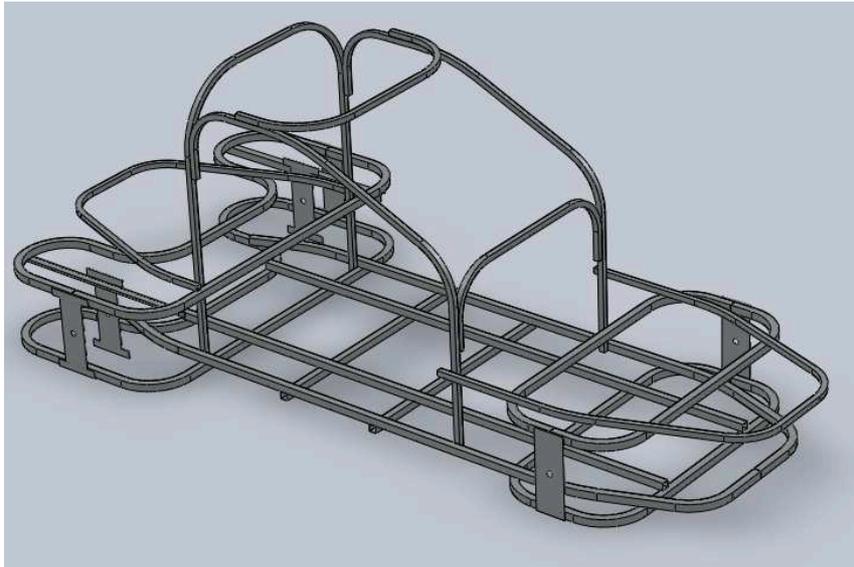


Figura 3.39: Chasis del vehículo Urbano en CAD.

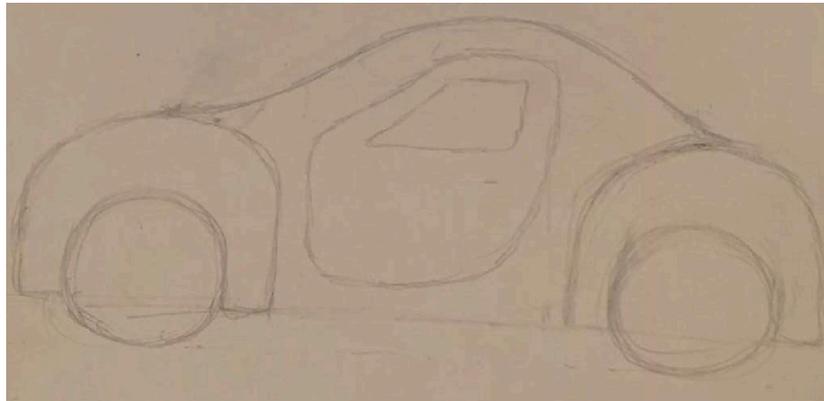
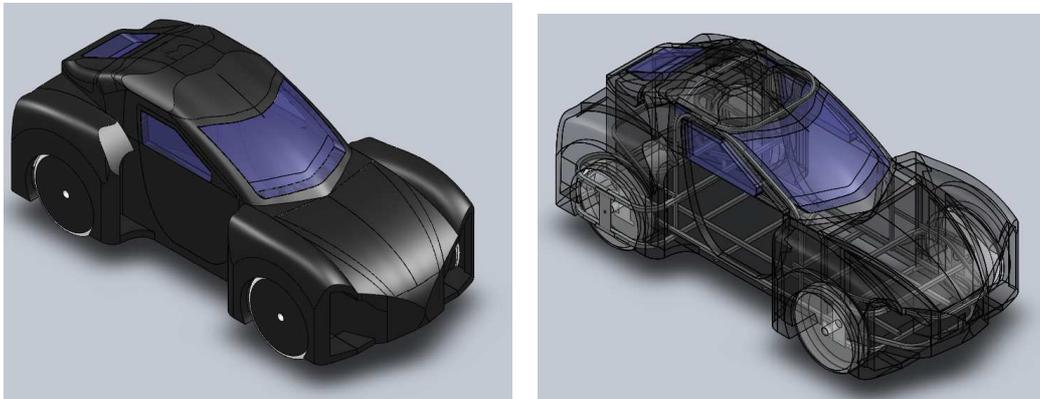


Figura 3.40: Boceto de la carrocería para el vehículo Urbano.

Después de haber analizado la estructura general del chasis en el boceto, se procedió a realizar el dibujo en CAD (el dibujo se realizó en SolidWorks) de este chasis, donde podremos realizar un análisis más completo del chasis del vehículo urbano, de este CAD se obtiene la cantidad de material que se emplea para su fabricación, así como un peso aproximado y resistencia del

mismo, este CAD se muestra en la Figura 3.39, el material elegido fue aluminio y por el trabajo realizado en el vehículo prototipo se conocen las limitaciones en el manejo de este material.



(a) CAD del primer vehículo Urbano.

(b) Ensamble de carrocería y chasis del vehículo Urbano.

Figura 3.41: CAD del vehículo urbano.

Con este concepto de chasis, se procede a trabajar en el desarrollo de una idea para la carrocería del vehículo urbano y al igual que con el chasis, partimos de bocetos e ideas que plasmamos en papel, después de varios diseños realizados se decidió trabajar en el diseño mostrado en la Figura 3.40.

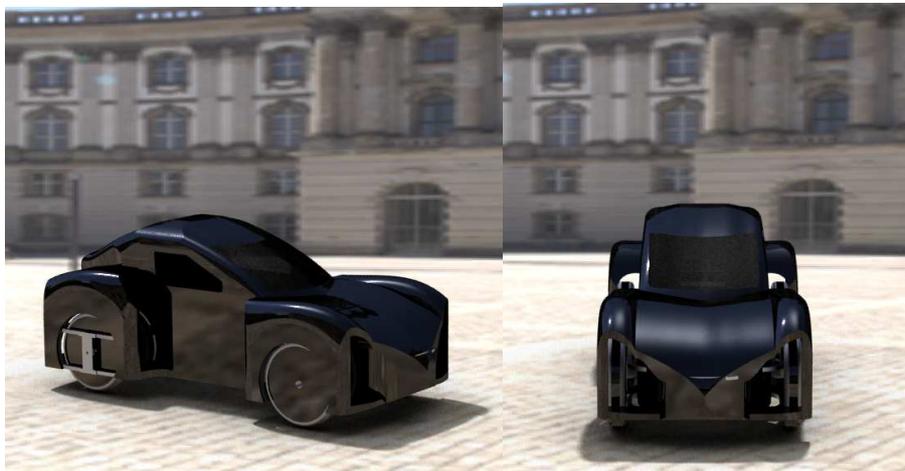


Figura 3.42: Render del vehículo Urbano.

Con el boceto definido, se procedió a realizar el dibujo en CAD (dibujo realizado en SolidWorks) el cual permite manipular la idea para analizar la forma en que se sujetará el chasis a la carrocería, así como también el peso estimado del vehículo, el paso del cableado, la dirección y el

sistema de frenado, este diseño se muestra en la Figura 3.41a, adicionalmente también se deben de analizar otros sistemas como es el encendido de luces, intermitentes, luz de frenado, limpiador de vidrios así como asegurar un sellado ante la lluvia, dimensiones de las puertas, cabina del conductor, porta equipaje entre otros detalles que diferencian al vehículo Urbano del prototipo.

Con los dos diseños realizados en CAD se procedió a unirlos en un ensamble como se muestra en la Figura 3.41b, en este ensamble resolvemos el problema de sujeción y unión de las dos partes (chasis y carrocería) antes de fabricarlos, así como también permite tener un modelo para presentar ante patrocinadores.

Como se mencionó ya resueltos los problemas de unión entre el la carrocería y el chasis, procedemos a realizar un render del vehículo completo, esto con el objetivo de promover el proyecto y financiar su fabricación, este render se muestra en la Figura 3.42.

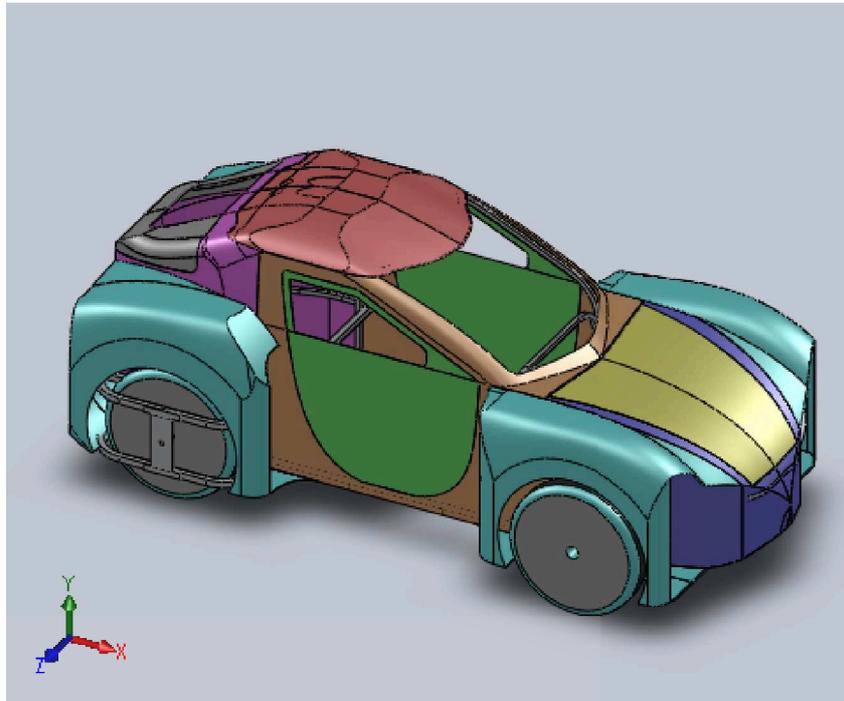


Figura 3.43: Piezas de la carrocería del Urbano dividida para los moldes.

Teniendo un presupuesto inicial, se procede a la fabricación del vehículo Urbano. Para la manufactura de la carrocería se procede al diseño de los moldes, en esta versión se decide realizar una división del vehículo y trabajar varios moldes por separado tal y como se realizó en la versión prototipo, dicha división se muestra en la Figura 3.43, donde se observa que el auto está constituido de 11 piezas.

Al igual que en el vehículo prototipo nombramos cada una de las piezas para realizar el ensamblado de cada molde, ya con cada una de las piezas procedemos a realizar el diseño de los moldes como se muestra en la Figura 3.44, en donde analizamos tanto el material que emplearemos, el ensamble del mismo, así como el proceso de desmolde para obtener las piezas de la carrocería, el material para la fabricación de estos moldes y por su bajo costo, empleamos MDF con pegamento.

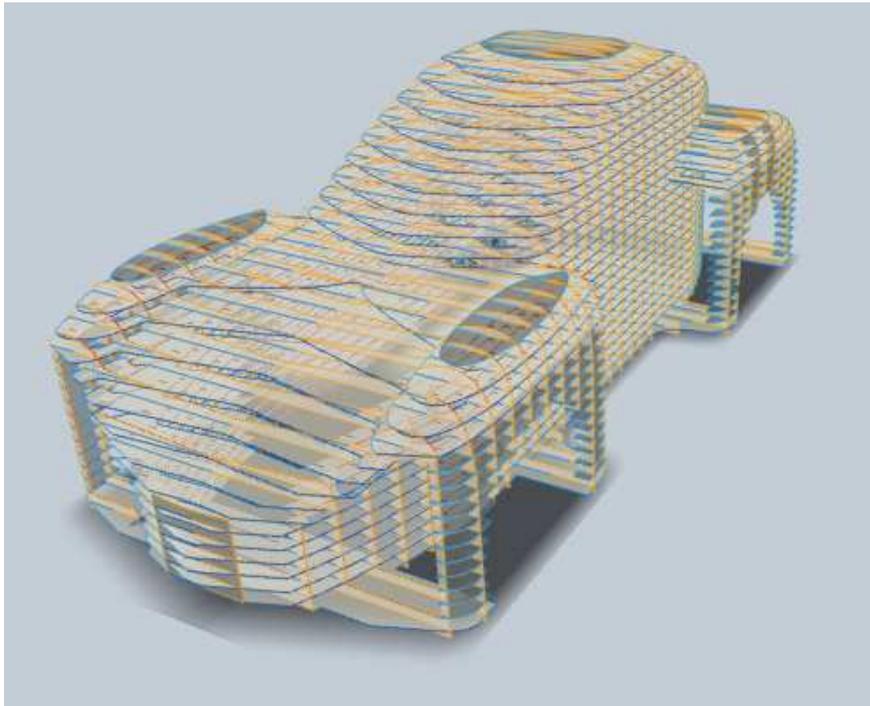


Figura 3.44: Moldes del vehículo Urbano.

### 3.2.2. Manufactura

En base a los diseños realizados de los moldes, procedemos a su fabricación con los materiales definidos anteriormente (Figura 3.45a), a diferencia del prototipo, este molde se realiza en 11 piezas separadas que se unen en una única pieza como se muestran en la Figura 3.45b, el proceso de ensamble de todos los moldes así como la unión entre ellos se realizó previamente en el CAD, para así verificar que se pueden unir sin problema.

Ya con los moldes fabricados, el siguiente paso que se realizó fue el preparado del molde, es decir el trabajo previo a la colocación de la fibra de vidrio, parte de este proceso se muestra en la Figura 3.46, que aunque en este apartado se está resumiendo, el trabajo realizado para preparar el molde llevo dos semanas de trabajo.



(a) Ensamble del molde del vehículo Urbano.

(b) Molde del vehículo Urbano armado.

Figura 3.45: Molde auto urbano.



Figura 3.46: Preparación del molde del vehículo Urbano para colocar fibra de vidrio.

Se a mencionado con anterioridad el proceso de fabricación de los moldes del vehículo prototipo y en esencia es el mismo para el vehículo urbano. Ya con los mismos terminados se procede

a colocar la fibra de vidrio como se muestra en la Figura 3.47, es importante recalcar que el proceso que se está empleando en esta versión es el más económico planteado hasta este momento y a diferencia del vehículo prototipo, se realizaron cambios en el mismo para facilitar el desmolde de las piezas, además por el proceso utilizado se espera que las piezas realizadas afecten directamente en el peso del vehículo así como también en el acabado, pero debido al presupuesto del que se dispone, fue la forma en que se logró sacar adelante el mismo.



Figura 3.47: Colocación de la fibra de vidrio sobre el molde del vehículo Urbano.

Con las piezas fabricadas sobre el molde sin emplear vacío ni otro molde para hacer presión

(molde hembra), se procede a desmoldar y cortar las piezas según sea necesario (de acuerdo al CAD), en la Figura 3.49 se muestra este proceso, adicionalmente y por el proceso de manufactura empleado es necesario realizar el detallado de las piezas (el proceso se eligió por falta de recursos), a diferencia del vehículo prototipo fabricado, en este punto se puede lijar la pieza completa, ya que el vehículo es un único molde que se irá trabajando por secciones de acuerdo al diseño del CAD, este proceso es para el acabado de la carrocería, y al igual que en el caso anterior se lija cada una de las piezas colocando pasta automotriz, tal y como se muestra en la Figura 3.48.



Figura 3.48: Lijado de las piezas del vehículo Urbano.

Aunque el proceso de lijar y cortar parece sencillo, si no se tiene bien ubicado los puntos por los cuales se debe cortar el material, así como el desmolde de la pieza, se puede volver una tarea sumamente complicada debido al tamaño de la pieza que se debe obtener, por lo que la parte de diseño es muy importante tanto para obtener un buen producto como para facilitar el trabajo.

Con las piezas lijadas y trabajadas, así como cortadas se ´rpede a dar un acabado a la carrocería (Figura 3.50), el cual se puede considerar como un detallado de las mismas, este es un punto crucial y que requiere mucho trabajo ya que sin este trabajo, el vehículo lucirá con rayones y piezas chuecas.



Figura 3.49: Desmolde de piezas del vehículo Urbano.



Figura 3.50: Piezas del vehículo Urbano primer lijado.

Debido a que la carrocería y el chasis son partes de un mismo sistema, estas deben ensamblar y debido al diseño del chasis, la carrocería debe tener diferentes cortes ubicados en diferentes puntos, los cuales fueron definidos en el CAD, algunos de los cortes realizados sobre la carrocería

se muestran en la Figura 3.51.



Figura 3.51: Corte de la carrocería del Urbano.

Con los cortes realizados se prosigue al pintado de la carrocería, con el fin de resaltar los detalles faltantes existentes (Figura 3.52).



Figura 3.52: Pintado del vehículo Urbano para resaltar detalles.

En paralelo al trabajo de la carrocería se va trabajando el chasis, no solamente para agilizar la manufactura del vehículo, sino también para corroborar que las piezas cortadas de la carrocería, así como la misma se encuentra correctamente fabricada.



Figura 3.53: Armado del chasis del Urbano, empleando tubos de aluminio rolados.

En la Figura 3.53 se muestra parte del proceso de armado del chasis, mientras que en la Figura 3.54 se muestra la primera vista del chasis, aunque no está terminado tiene sus principales puntos de apoyo, los cuales sirven para agarrar la carrocería y unir las dos piezas.

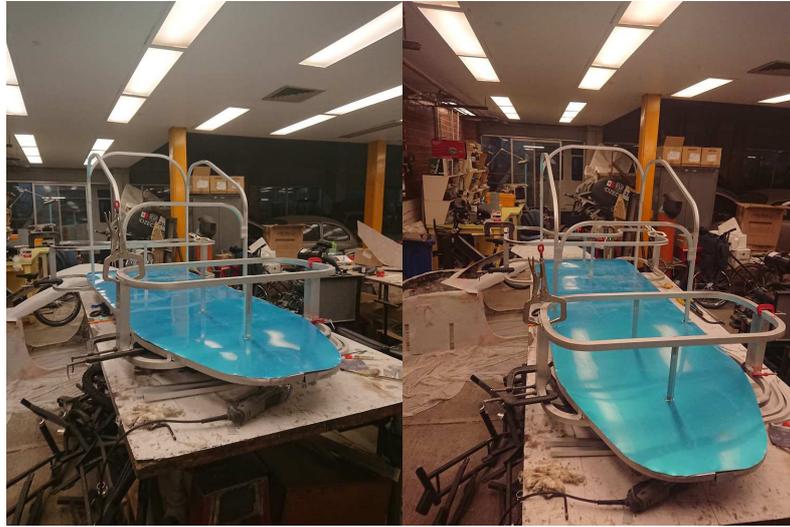


Figura 3.54: Primera vista del chasis del Urbano con su piso colocado.

Como se ha mencionado, una de las razones del armado del chasis en paralelo es para verificar el correcto ensamble del vehículo, esto debido a los errores de manufactura que puedan existir entre ambas piezas y el ir asegurando que no existan problemas en la unión (Figura 3.55).

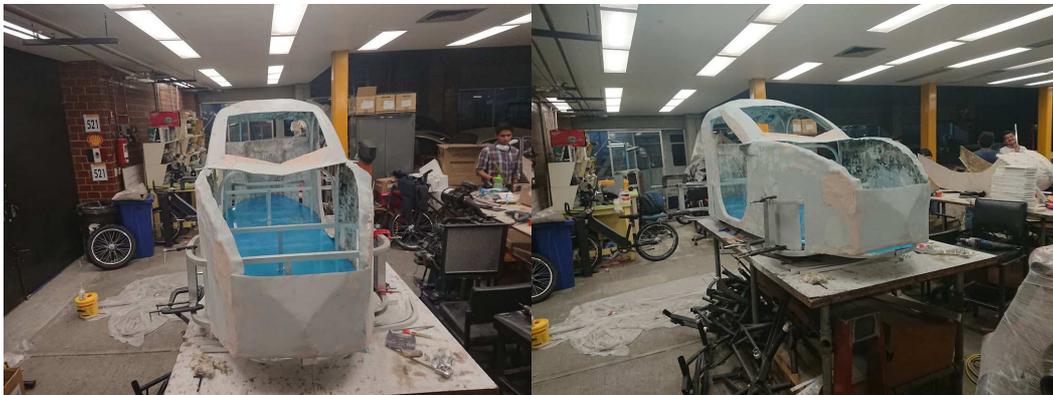


Figura 3.55: Presentación de la carrocería con el chasis del vehículo Urbano.

Posteriormente a la presentación del chasis y la carrocería, se procede a asegurar que no existan problemas en el ensamble de las dos piezas. Posteriormente se prosigue a seguir realizando el acabado de la carrocería, después del pintado de la misma los pequeños detalles existentes en la misma son apreciables y debido a que el acabado de la carrocería es la presentación del proyecto, se le dan nuevamente un trabajo de llenado y lijado (Figura 3.56).



Figura 3.56: Segundo detallado y rellenado de huecos de la carrocería del vehículo Urbano.



Figura 3.57: Colocación de la dirección del Urbano.



Figura 3.58: Presentación y medidas de las llantas en el chasis del vehículo Urbano.

Ya con el chasis y con sus puntos de sujeción principales, se prosigue a colocar la dirección del vehículo urbano (Figura 3.57), así como también se empiezan a colocar los puntos de sujeción de las ruedas (Figura 3.58), aunque en este punto del proyecto no se han conseguido las llantas que cumplan con el reglamento, se consiguieron unas ruedas prestadas que aunque no son del tamaño sirven para realizar las piezas de sujeción.

Así mismo en paralelo después de haber terminado de trabajar la carrocería se procede a colocar la base de la pintura a cada una de las piezas tal y como se muestra en la Figura 3.59, en este punto a la carrocería se le han dado varias veces un lijado y asentado a toda debido al proceso de fabricación.



Figura 3.59: Pintado y armado de la carrocería del vehículo Urbano.

Mientras que el auto urbano al tener colocada la dirección lo único que hace falta es la fabricación del asiento, por lo que es importante revisar la ergonomía del piloto tal y como se muestra en la Figura 3.60a, dónde corroboramos que sea cómodo así como también que cumpla los requerimientos para la competencia, posteriormente a la medición se prosigue a fabricar el asiento con las medidas finales obtenidas (Figura 3.60b).



(a) Medición del piloto y revisión de la ergonomía del Urbano.



(b) Fabricación del asiento.

Figura 3.60

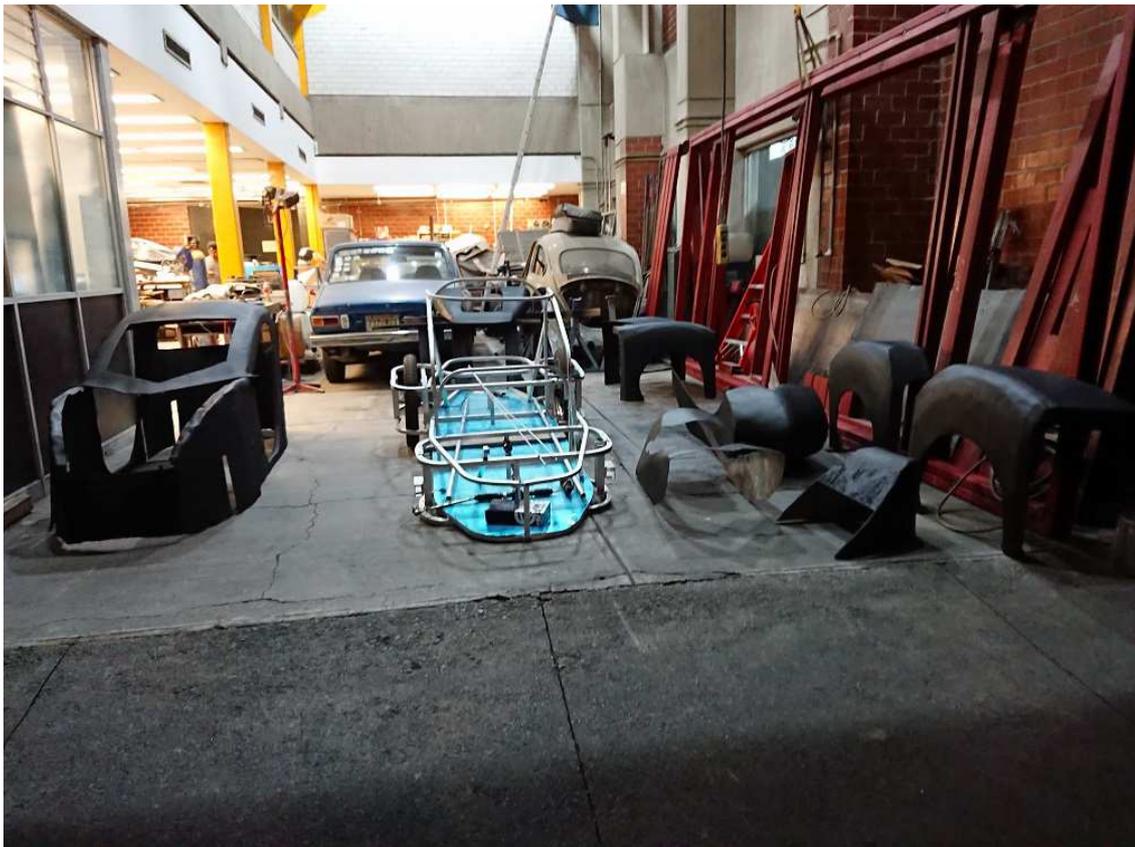


Figura 3.61: Pintura de fondo de la carrocería del Urbano.

Con la carrocería pintada en su color primario se procedió a pintarla según el diseño seleccionado, para esto se escogieron dos colores el negro de fondo y el rojo para darle un diseño al mismo, en la Figura 3.61, se muestra el proceso de pintado, mientras que en la Figura 3.62 se muestra la carrocería ensamblada y con su pintura de fondo.



Figura 3.62: Carrocería del Urbano pintada.



Figura 3.63: Colocación del tablero, volante y pedal de freno.

Entre los puntos finales del auto urbano, previo a la colocación de las ruedas y la unión con la dirección, el auto necesita de un tablero del cual sea posible controlar diferentes elementos como lo son las luces, intermitentes, limpiador, etc. por lo que es necesario tomar medidas en base a la posición final del piloto. Adicionalmente también es necesaria la colocación del freno de tal forma que esté en una buena posición para el manejo y por ultimo definir el largo del telescopio para así sujetar el volante (Figura 3.63).



Figura 3.64: Colocando la dirección y las llantas finales.

Con lo anterior fijo y en posición se prosigue al último punto el cual es la colocación de las llantas finales uniendo la dirección a las mismas, en la Figura 3.64 se muestra la colocación de la dirección y las llantas con sus respectivos motores.

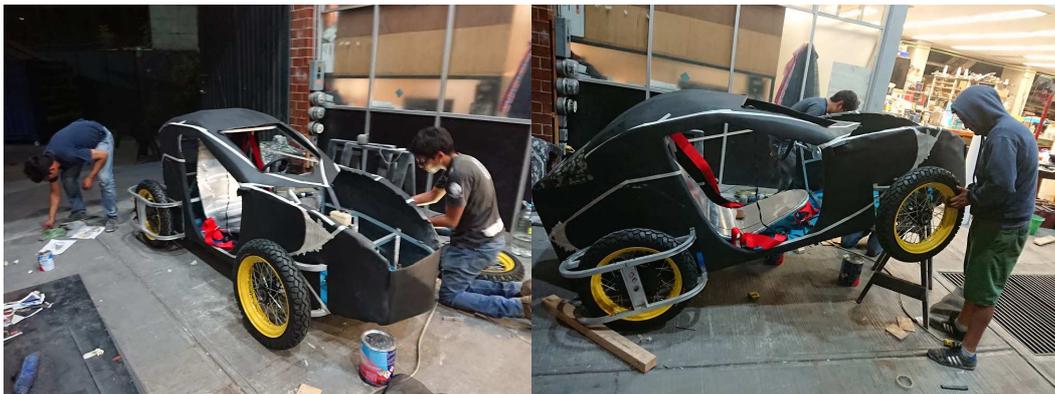


Figura 3.65: Presentando el chasis y carrocería.

Con todo lo anterior terminado, lo último a realizarle al vehículo Urbano es terminar el diseño de la pintura, para asegurar que las líneas, así como la colocación de la pintura sea correcta

se colocan marcas sobre la carrocería previas a su pintado (Figura 3.65), así como también se presentan todos los elementos del vehículo.

Posteriormente a tapar las áreas que permanecerán del color del fondo, se procede a pintar la carrocería tal y como se muestra en la Figura 3.66, y una vez seca la pintura se retiran estas coberturas para así obtener el diseño final, pero para proteger la pintura se necesita colocar una capa final llamada transparente, con la cual la pintura colocada se vuelve más resistente ante alguna ralladura.



Figura 3.66: Preparando el vehículo Urbano para la pintura.

Por último se realiza el ensamble de todas las partes del vehículo, así como también su cableado y se electrónica (encargada de accionar el vehículo), en la Figura 3.67 se muestra el vehículo urbano completo así como también se muestra que se encuentra en la competencia de Shell Eco Marathon 2019 que se llevó acabo en San Francisco California Estados Unidos, en dicha figura se puede apreciar no solamente como se ve el auto completamente terminado, sino que además, también se observa la forma en que se trabaja durante la competencia, así como también se muestra el controlador colocado sobre el cofre del vehículo.



Figura 3.67: Vehículo Urbano completo.

## Capítulo 4

# Diseño y manufactura de la Electrónica

En este capítulo se habla del proceso que se ha llevado a cabo para el diseño de cada uno de los circuitos a fabricar, así como también se le da énfasis al conocimiento que se ha adquirido a lo largo de los años, tanto en las principales pruebas realizadas, diseños más relevantes, así como un resumen de la investigación realizada dentro de este tipo de circuitos electrónicos.

### 4.1. Diseño general del controlador

Como ya se mencionó con anterioridad, en esta sección se realiza el diseño general de los controladores para motores brushless de tres fases, con el cual se activarán todos los motores de los vehículos que se desarrollaron, los cuales tienen como diferencia principal la potencia de trabajo que posee cada uno de ellos.

El primer paso y más importante para desarrollar un controlador es el entender que se va a realizar y como va a funcionar la electrónica, de tal forma que se pueda obtener el mejor resultado posible, ya que se está trabajando con sistemas de potencias mayores a los 500 [W].

Partimos de saber qué tipo de motor emplearemos, como ya definimos es un motor trifásico llamado brushless, sabiendo esto pasamos al hecho de que existen dos tipos de configuraciones posibles en motores trifásicos, en delta y en estrella, afortunadamente en nuestro caso contamos con datos técnicos de los motores con los que se estarán trabajando, los cuales están conectados

en estrella, de no conocer el tipo de conexión se tiene que realizar un análisis antes para conocer la conexión y así proceder al diseño [1].

El tipo de motor con los que se está trabajando son brushless en los cuales existen dos posibilidades, que tengan sensores de efecto hall o que no tenga, al igual que en el caso anterior por los datos técnicos, sabemos que el motor está constituido de tres sensores de efecto hall, lo que quiere decir que cada una de las bobinas está ligada a un sensor, este dato es necesario saberlo para realizar el diseño ya que cada bobina se debe encender y apagar en un momento específico.

Con el dato inicial comentado en el párrafo anterior, procedemos a identificar que sensor corresponde a cada bobina, generalmente los sensores y las bobinas traen el mismo color de cable para identificarlos con facilidad, estos colores vienen en azul, amarillo y verde, en caso de no contar con un código de colores para identificar que sensor corresponde a cada bobina la manera más fácil de localizar que sensor corresponde a cada bobina es activar y desactivar las bobinas y observar las respuestas de los sensores.

Es importante distinguir entre los controladores de motores brushless con y sin sensores Hall, ya que los primero son más suaves en salidas desde 0 [km/h] especialmente cuando hablamos de motores de más de 250 [W] y sin engranajes; los otros en cambios son más fiables y consumen menos energía una vez lanzados, en este caso trabajaremos con motores que poseen sensores.

Para lograr que el motor se active primero es necesario entender como activar y desactivar la bobinas que posee el motor, conocemos que es una conexión tipo estrella (Figura 4.1), para activar una bobina es necesario permitir el paso de la corriente eléctrica en un sentido, pero debido a que estamos trabajando con tres bobinas en simultaneo, una bobina queda en positivo, otra en tierra y la última en circuito abierto.

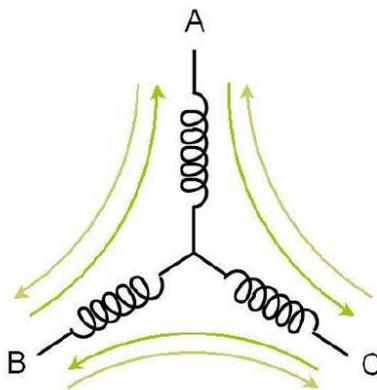


Figura 4.1: Tres fases.

Tomando como base la configuración básica de una rama de potencia (Figura 4.2), para lograr

la conmutación se necesita ir intercambiando el sentido de la conmutación en las bobinas, de tal forma que en un momento en especial una de las tres bobinas se encuentre en circuito abierto [1].

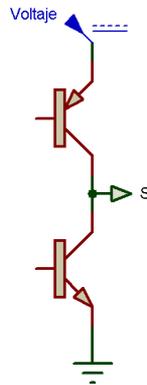


Figura 4.2: Una rama.

Para lograrlo se plantea el colocar la configuración de puente H entre la bobinas (Figura 4.3), teniendo este principio y la secuencia de conmutación de los sensores, se prosigue a diseñar un circuito que permita no solamente conmutar la etapa de potencia de manera automática, sino que también permita controlar la corriente que circula por la misma etapa de potencia, evitando que el circuito se quemara debido a un exceso de corriente.

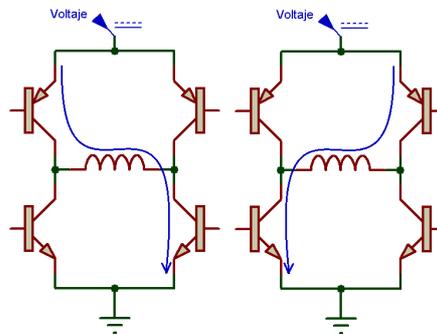


Figura 4.3: Puente H con representación de flujo.

El circuito a grandes rasgos queda como se muestra en la Figura 4.4, donde se representan las tres bobinas (tres bobinas en conexión estrella) conectadas a la etapa de potencia que permite dejar en un momento una bobina en circuito abierto.

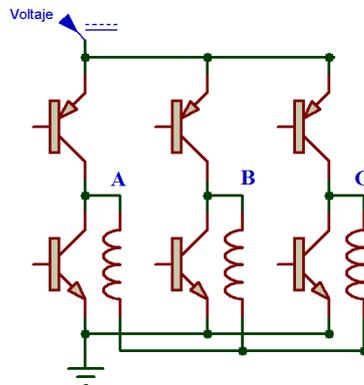


Figura 4.4: Ramas con tres fases.

Ya teniendo la idea general de como conmutar las bobinas ahora es necesario el relacionar la conmutación de estas con los sensores que posee el motor, esto con la finalidad de activar el motor y permitir su correcto funcionamiento, la secuencia que relaciona a los sensores y a las bobinas se muestra en la Figura 4.5.

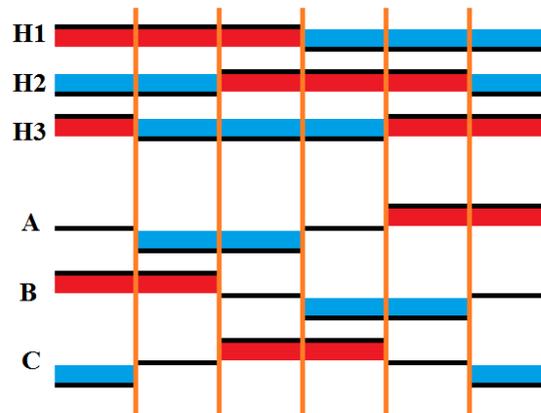


Figura 4.5: Secuencia y sensores de efecto hall relacionados.

Con toda la información mostrada hasta este momento, se puede proceder al diseño del controlador para cada uno de los vehículos, los cuales como se han mencionado utilizan motores Brushless de tres fases a 48 [V], pero a diferentes potencias.

Un controlador se puede dividir en pequeños circuitos que integran a un circuito de mayor complejidad, para este caso se puede dividir en:

- Circuito de disparo.

- Potencia.
- Control de corriente.

## **Circuito de disparo**

Este circuito es el encargado de adquirir las señales provenientes de los sensores de efecto hall y sincronizarlos con las bobinas de tal forma que provea la secuencia de conmutación necesaria para mover el motor, además este circuito permitir controlar la velocidad a la cual estará avanzando el motor, permitiendo poseer una entrada a la cual el usuario tendrá acceso (este circuito es con el cual el usuario está en contacto).

## **Potencia**

Este circuito es el encargado de recibir la carga de la bobina y es el que al final suministra tanto el voltaje como la corriente que pasará por el motor.

## **Control de corriente**

Este circuito es el encargado del monitoreo de la corriente que circula a través del motor, es el circuito que protege (limita la corriente) la potencia de sufrir una sobre carga de corriente, con lo cual se evita que se quemé con facilidad.

### **4.1.1. Antecedentes**

Con los circuitos definidos para la realización del controlador, se prosigue al diseño de cada uno de manera individual, pero siempre teniendo en cuenta que, aunque son circuitos separados, trabajaran en conjunto formando un circuito mayor.

Para el diseño de estos circuitos se toma como base los controladores fabricados con anterioridad para diversos motores con diferentes características, entre los cuales se destacan los motores de corriente directa (DC) y los motores de pasos con diferente cantidad de fases, a continuación se describen los principales controladores que sirvieron para este trabajo, resaltando lo bueno y lo malo de cada uno ya que en base a este conocimiento adquirido se llegó a los controladores fabricados hasta este momento.

#### 4.1.2. Controlador para motor de pasos de 5 fases

Uno de los primeros controladores fabricados y de los cuales surgen los diseños realizados hasta este entonces, es el controlador para un motor de 5 fases (Figura 4.6), el cual trabaja a un voltaje de 300 [V] y una corriente de 1.75 [A] lo que da como potencia 525 [W], este motor pertenece a una máquina CNC láser localizada en la Facultad de Ingeniería [1].



Figura 4.6: Motor encontrado en la máquina CNC EMCO LS140 [1].

En el desarrollo de este controlador se tomaron las primeras decisiones importantes de las cuales se descubrieron algunos errores que no se toman en cuenta a la hora de diseñar y construir una etapa de potencia, para las primeras pruebas del controlador se diseñó un sistema que permitiera conmutar las bobinas, debido a que sabíamos las características del motor, se optó para la primera prueba construir el controlador en una placa fenólica de pruebas la cual se muestra en la Figura 4.7, para este primer diseño (el origen de todos los diseños) el componente que se decidió utilizar para realizar la conmutación de la etapa de potencia fue un Atmega328 en una tarjeta Arduino, en el cual las terminales del Arduino se conectan al circuito de disparo diseñado para esta etapa.

El resultado de las pruebas realizadas a esta primera etapa de potencia fueron que aunque la etapa de potencia permitía el movimiento del motor, no era muy estable ya que el movimiento de la flecha del motor fue un factor que no se pudo controlar con esta primera versión, además de un calentamiento en la misma debido a la exigencia que tenía en cuestión de potencia, cabe

resaltar que esta etapa de potencia no se probó al voltaje nominal del motor ya que en ese momento no se contaba con una fuente de alimentación que permitiera realizar esa prueba.

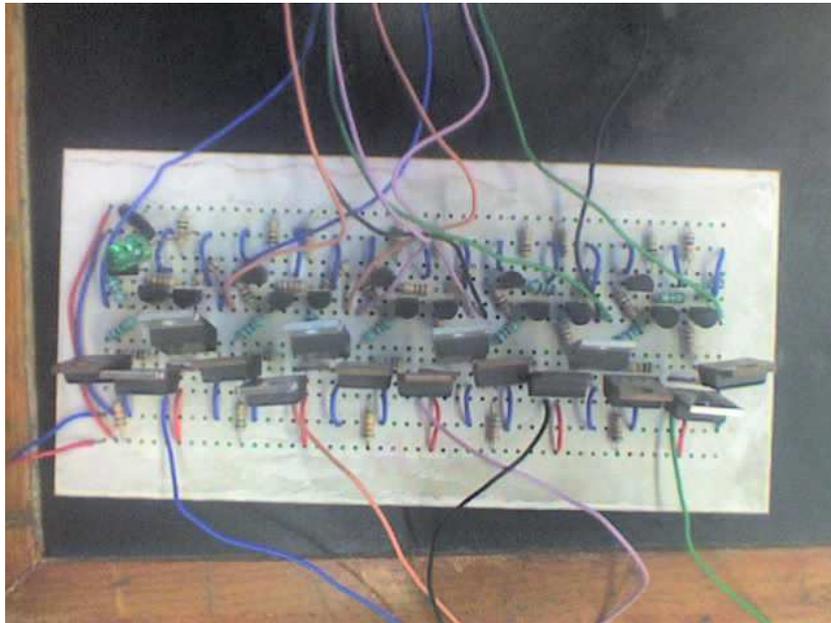


Figura 4.7: Prototipo de la etapa de potencia V1 construida en una placa fenólica [1].

Entre lo aprendido en este controlador es que la estabilidad en los componentes utilizados es crucial, además de que para realizar un controlador con la capacidad de resistir el uso constante es necesario resolver los problemas de calentamiento de los componentes, un factor que va ligado al control de corriente, circuito del cual carecía esta primera versión.

Después de un análisis profundo al motor, a controladores existentes, al comportamiento de los componentes del controlador y al estudio del comportamiento de las bobinas ante la conmutación, se diseñó un nuevo controlador, una descripción más detallada de este análisis se muestra en el trabajo de tesis denominado **Actualización de una Máquina CNC por corte Láser** en la sección 3.5 encontrada en las páginas 102 hasta la 118.

Del análisis realizado se diseñó un nuevo controlador la cual se muestra en la Figura 4.8, este controlador arregló las fallas existentes en la primera versión, la principal desventaja de este es el tamaño ya que para solucionar en ese momento los problemas de conmutación y aislamiento de ruidos se optó por utilizar fuentes separadas, lo que incrementaba considerablemente el tamaño del mismo, aunque la estabilidad y el calentamiento de los componentes se logró arreglar, la mayoría de estas decisiones se tomaron debido al tiempo que se tenía para lograr terminar este trabajo ya que era necesario integrar más sistemas.

El único problema encontrado en esta versión de controlador fue que debido a que estaba realizado en protoboards, el circuito presentaba falsos lo que ocasionaba que conforme pasaba el tiempo y las pruebas, el sistema fuera repetible en dos o tres repeticiones, problema que se resuelve pasando el circuito a una tarjeta fenólica, punto que se trató en la tesis como trabajo a futuro, el cual se muestra en el trabajo actual.

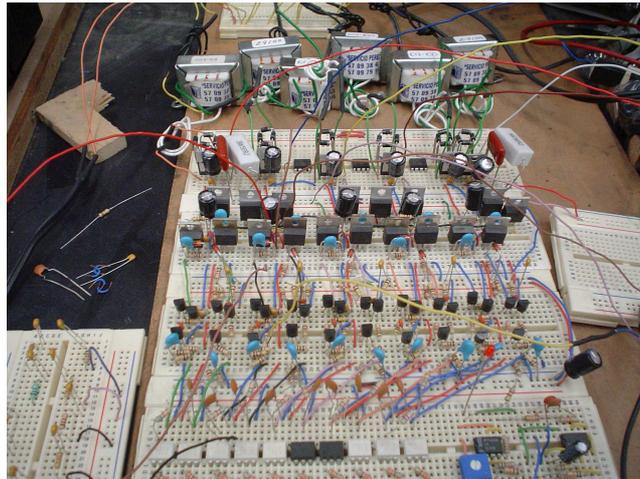


Figura 4.8: Etapa de potencia V2 armada en protoboard [1].

Debido a los problemas de falsos contactos por la manufactura, se prosiguió a realizar la tarjeta fenólica, cuyo diseño se muestra en la Figura 4.9, este fue de los primeros diseños realizados en electrónica de potencia, de donde se tomaron en cuenta factores importantes como son el ancho de pista, la distribución de los componentes, así como también la manufactura de este tipo de circuitos.

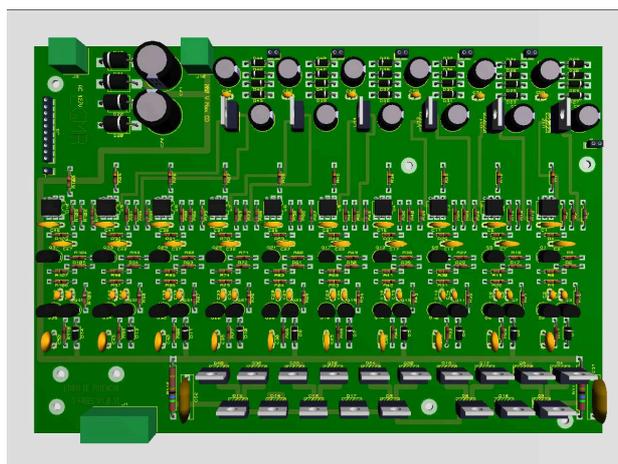


Figura 4.9: Diseño de etapa de potencia V2.

En la Figura 4.10 se muestra la primera tarjeta fabricada para un controlador, comparando el tamaño con el diseño fabricado en protoboards, adicionalmente a este controlador se le ha colocado un rectificador a la entrada para alimentar a 127 [V] en alterna (decisión que se tomó al final por facilidad de uso aunque el controlador funciona a 300 [V]), así como también se le agregó un fusible para proteger al motor y a la misma electrónica.

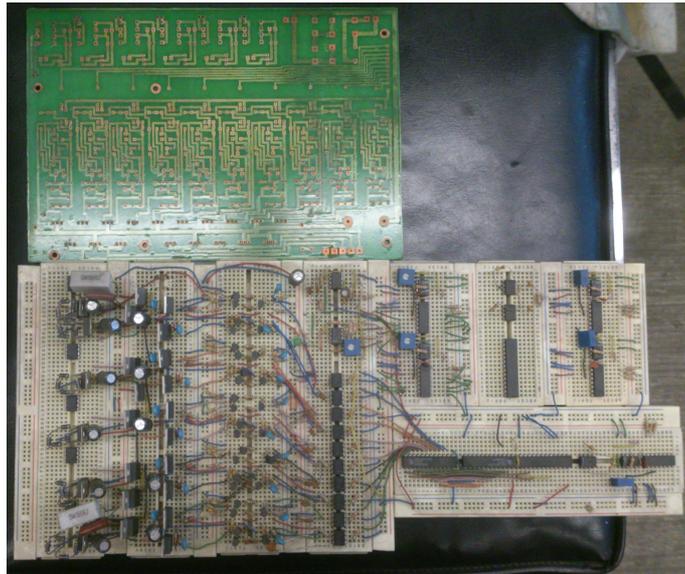


Figura 4.10: Etapa de potencia V2 armada en protoboard y tarjeta fenólica fabricada.

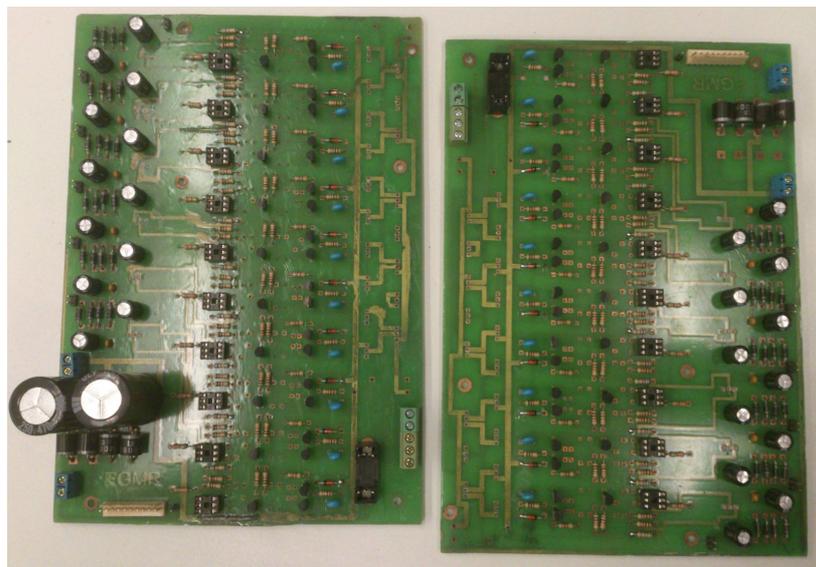


Figura 4.11: Etapa de potencia V2.

En la Figura 4.11 se muestran los dos controladores soldados con la mayoría de sus componentes, después de realizar estos prototipos de controlador en tarjetas fenólicas se descubrió que se había omitido un factor en el diseño, el cual fue el soldado de los componentes y las conexiones entre las dos caras de la tarjeta, aunque no es un problema en la realización de dos prototipos, al fabricar más controladores, se vuelve una tarea tardada ya que con un mejor diseño de distribución de pistas, se podría evitar la pérdida de tiempo en esta tarea.

### 4.1.3. Controlador para motor de DC 250 [W]

Con la base adquirida en el trabajo de tesis se prosiguió al desarrollo de un controlador para un motor de 250 [W] (Figura 4.12), pero en este caso se trabaja con un motor de corriente directa (DC), a diferencia del caso del controlador V2 donde se trabajaron con múltiples fases, en este controlador únicamente se trabaja con una única fase.

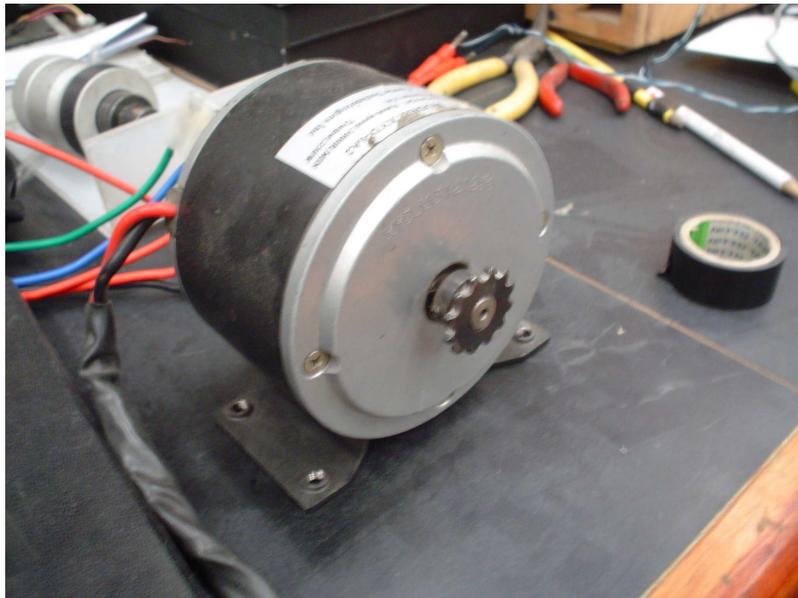


Figura 4.12: Motor de DC a 250 [W].

Al trabajar con una única fase se facilita la visualización del comportamiento del controlador así como de la respuesta que tiene la bobina ante la conmutación, a diferencia del controlador V2 fabricado para la máquina láser, este controlador trabaja a un voltaje y corriente diferente, esto debido a que el motor funciona a 24 [V] y 10 [A], aunque la potencia del motor es menor, en este diseño lo principal a resolver es el manejo de corrientes superiores al controlador V2.

Para este controlador y debido a la experiencia adquirida hasta este punto se decidió realizar la manufactura en una placa fenólica de pruebas la cual se muestra en la Figura 4.13, como se está

trabajando con un motor más sencillo que el de la máquina láser, el controlador es más pequeño, lo importante en este controlador es el circuito de control para el monitoreo de la corriente.

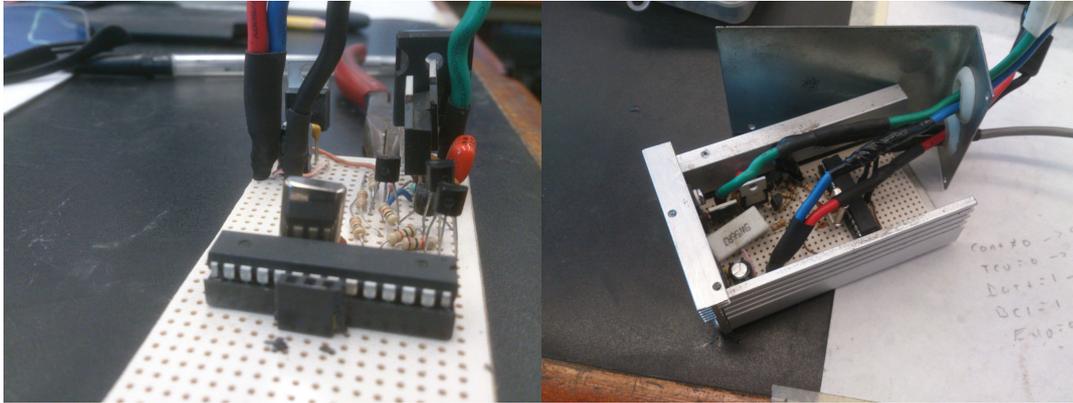


Figura 4.13: Controlador para motor de DC V3 .

Al realizar las pruebas de funcionamiento con y sin carga se pudo observar el comportamiento del controlador con su circuito controlador de corriente, lo principal que hay que resaltar en estas pruebas es el comportamiento de la etapa de potencia del controlador, ya que en este controlador se empleó un único Mosfet por el cual circula la corriente de la bobina, en la Figura 4.14 se muestran las señales obtenidas de la bobina del motor en la parte del circuito de potencia, la imagen de la izquierda en la Figura 4.14 muestra la conmutación de la bobina antes de la colocación del circuito de control de corriente fijando el límite de la misma (las pruebas se realizaron con carga en el motor), en el cual la etapa de potencia se calentaba en exceso, al punto de llegar al fallo por temperatura, mientras que en la imagen de la derecha se muestra la conmutación de la bobina con el circuito de control de corriente, en este caso aunque la conmutación no está completamente libre de ruido, se observa una mejoría en la conmutación, lo que se aprecia también en el calentamiento de la etapa de potencia.

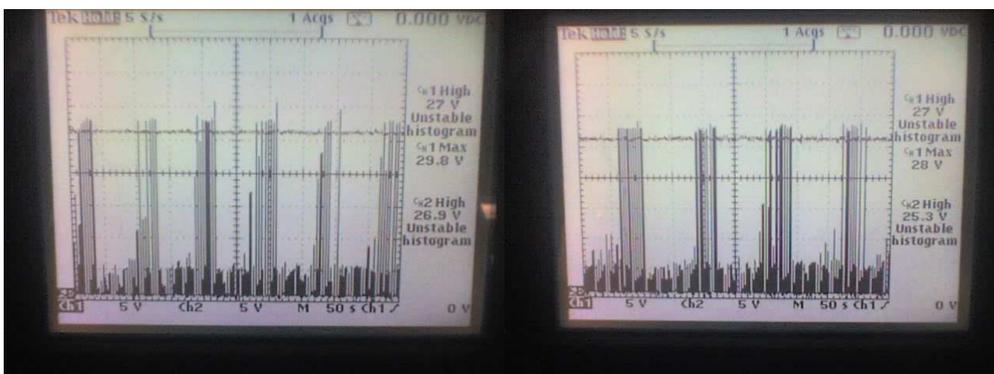


Figura 4.14: Señal de conmutación en el controlador V3.

#### 4.1.4. Controlador para motor brushless de 5 fases a 1000 [W]

Con la base del controlador de los motores de pasos de la máquina láser, así como también del controlador para el motor de DC, se prosiguió al desarrollo de un controlador pero para este caso es un motor brushless de 1000 [W] (Figura 4.15) y al igual que el caso del controlador de la máquina láser anterior, es un motor de 5 fases, pero en el caso del controlador V2 la potencia con la que se trabajó fue menor principalmente en la corriente que consume ya que este motor trabaja a 48 [V] y a 20 [A], valores de trabajo también muy superiores al controlador V3, pero que aun así sirvieron de base para diseñar este controlador.

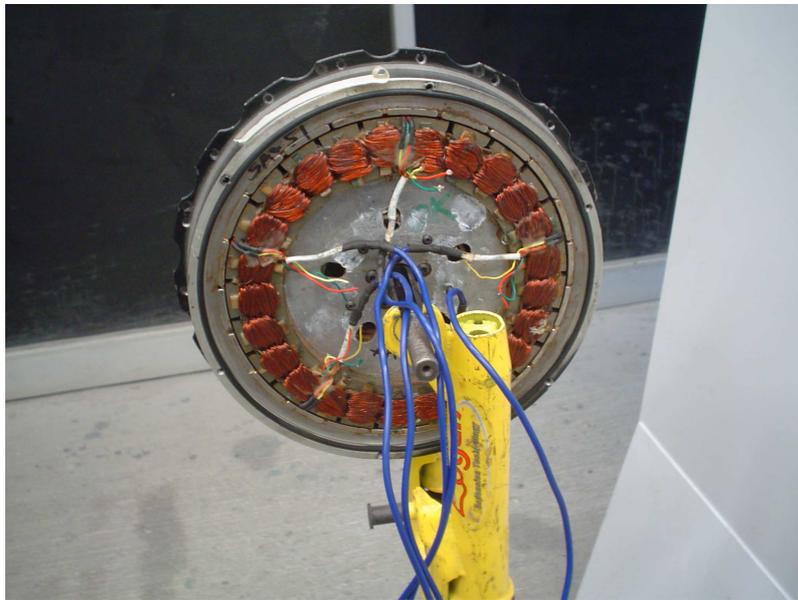


Figura 4.15: Motor brushless de 5 fases a 1000 [W].

Como se ha mencionado con anterioridad, los motores brushless pueden o no poseer sensores de efecto hall, en este caso el motor posee cinco sensores de efecto hall que corresponden a cada una de las bobinas, cada uno de los sensores permiten la activación de la secuencia necesaria para mover el motor, esta secuencia es la misma que la encontrada en el trabajo de tesis **Actualización de una máquina CNC por corte láser** en las páginas 92 y 93.

A diferencia de los motores con los que se estarán trabajando en este trabajo de tesis, este motor no posee un código de colores que corresponde a cada una de las bobinas con los sensores de efecto hall, por lo que es necesario identificar que sensor corresponde a cada una de las bobinas, como mencionamos anteriormente la forma de identificarlos es accionar cada una de las bobinas y observar la respuesta de cada uno de los sensores.

Al identificar los sensores se prosiguió a la fabricación de un controlador prototipo (Figura 4.16), el cual fue basado en los controladores V2 y V3 construidos con anterioridad, el diseño de la etapa de potencia es la misma que en el caso del controlador V2 y al igual que en la V1 empleamos una tarjeta Arduino para probar la secuencia de conmutación, a diferencia del controlador V2 los componentes que se emplean para conmutar cada una de las bobinas son diferentes, pero el circuito de disparo y de control de corriente es el mismo que el empleado en el controlador V3, con la diferencia de los voltajes a los que trabajan y la corriente que debe soportar el circuito de control de corriente.

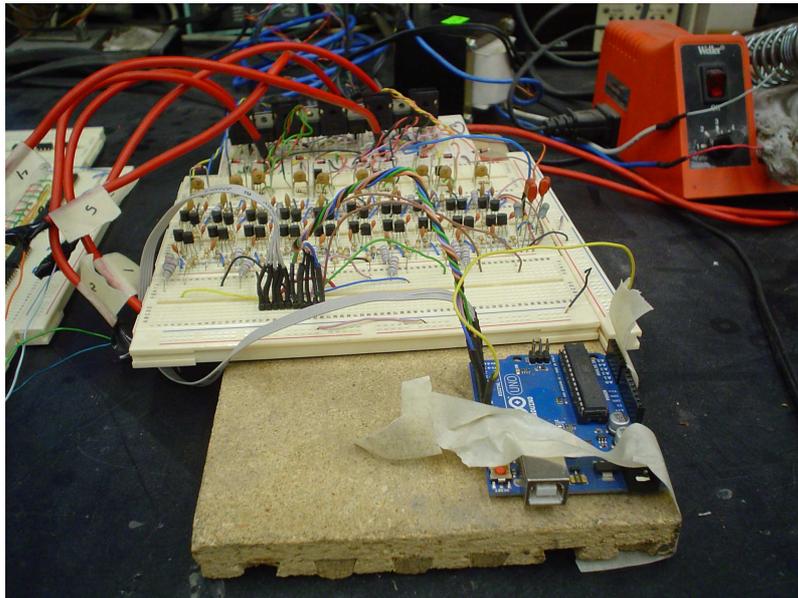


Figura 4.16: Controlador para motor brushless de 5 fases V4 armada en protoboard.

Este controlador es el primero fabricado para la fórmula Shell 2013 pero debido a la falta de tiempo para fabricar este controlador, así como la poca experiencia en este tipo de controladores y por la necesidad de diseñar y fabricar para esta fórmula un BMS, se optó por emplear un motor más simple de controlar como lo es un motor de corriente directa, el motor encontrado en ese momento fue un motor de 8 [HP].

Posteriormente a la fórmula se continuó trabajando en este controlador lo que llevó a la fabricación de una nueva tarjeta fenólica, así como un sistema de control, para ir realizando pruebas con diferentes circuitos se dividió el controlador en diferentes secciones.

Lo que es importante resaltar en este diseño es el diseño de una etapa de potencia de mayor capacidad tanto en corriente como en potencia, así como la integración de varios circuitos alrededor de una etapa de potencia más compleja, tanto por su control de conmutación, la cantidad de bobinas, así como también la potencia que a la que se trabaja.

#### 4.1.5. Controlador para motor de DC 8 [HP]

Como ya se ha mencionado, en la fórmula Shell del 2013 se empezó trabajando con un motor brushless de 5 fases a 1000 [W], pero debido a la falta de tiempo así como a la complejidad y falta de experiencia se optó por emplear un motor diferente, el cual fuera de DC, pero debido al poco tiempo con el que se contaba, solo se pudo conseguir un motor de 8 [HP] para trabajar, este motor así como el tren motriz que se empleó se muestra en la Figura 4.17.



Figura 4.17: Motor de 8 [HP] y su tren motriz.

Para diseñar el controlador y entender las características de este motor, así como también observar el comportamiento de la corriente, se decidió realizar un controlador prototipo, en este diseño se tomo como base el conocimiento adquirido en el controlador V3 del motor de 250 [W], con la diferencia en que la corriente con la que se trabaja es superior, el voltaje de este motor es de 24 [V] con una corriente aproximada de 250 [A].

Con el dato de voltaje y corriente se diseñó una etapa de potencia con la capacidad de soportar una corriente de 250 [A], corriente con la cual hasta este momento no se había trabajado, debido a la potencia con la que se trabaja en este diseño, también se colocó un ventilador para mantener los componentes de potencia dentro del rango de operación, este controlador prototipo se muestra en la Figura 4.18.

En estas pruebas se pudieron obtener datos experimentales importantes como lo son los picos de corriente que genera este motor al arranque, los cuales fueron mayores a lo esperado en el diseño, así como también, una falla de diseño en el circuito de control de corriente, el cual fue liberado completamente sin proveer protección al circuito de potencia, lo que ocasionó que cuando se encendió el controlador prototipo, con el motor sin carga, la electrónica se quemara en un instante.

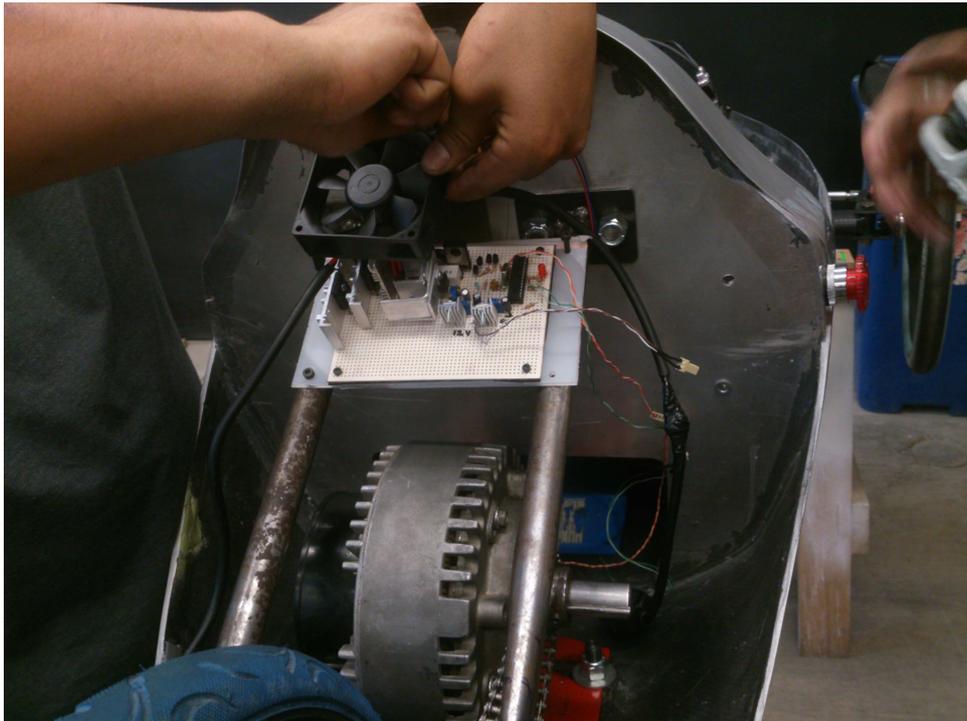


Figura 4.18: Controlador prototipo para motor de DC a 8 [HP].

Debido a lo sucedido durante la prueba se llevó a cabo un análisis de la falla, cuyo resultado fue:

1. El circuito de potencia carecía de la capacidad para un uso constante.
2. El circuito regulador de corriente no tenía la capacidad de regular tanta corriente.
3. El enfriamiento era inadecuado.
4. El ruido generado por la bobina del motor era demasiado, tanto que afectaba a toda la electrónica a su alrededor.
5. Falla en la conmutación de control debido al ruido.

Hasta este momento en todos los diseños anteriores, todos estos problemas ya se habían presentado, pero en menor medida, pero para la potencia con la que se está trabajando las soluciones encontradas y empleadas con anterioridad fueron insuficientes.



Figura 4.19: Controlador V5 para motor de 8 [HP].

La forma en que se fue solucionando cada uno de estos problemas, se describen a continuación.

1. El circuito de potencia carecía de la capacidad para un uso constante.  
Se distribuyó la carga de la bobina en una mayor cantidad de elementos, así como también se calculó nuevamente el ancho de las pistas por las cuales circula la corriente.
2. El circuito regulador de corriente no tenía la capacidad de regular tanta corriente.  
Se cambió la shunt ya que la capacidad de la primera era demasiado pequeña a lo necesario, saturando el circuito de protección y evitando que entrara en acción.
3. El enfriamiento era inadecuado.  
Se construyó una caja especial para distribuir el aire de los ventiladores a través de los disipadores, lo cual permite mantener los componentes fríos ante la potencia que circula por ellos.
4. El ruido generado por la bobina del motor era demasiado, tanto que afectaba a toda la electrónica a su alrededor.

La solución que se pudo encontrar en este momento fue separar la tarjeta de potencia y la tarjeta de control de disparo y medición, de tal forma que al colocar filtros en la electrónica, estos absorbieran el ruido de la conmutación.

5. Falla en la conmutación de control debido al ruido.

Al separar las tarjetas de potencia y de conmutación, se logró aislar el ruido de la bobina no completamente, pero con los filtros colocados en el circuito de conmutación, como en la alimentación se logró anular lo suficiente el ruido, permitiendo que los componentes se comportaran de manera estable.

En la Figura 4.19 se muestra el controlador V5 así como también la tarjeta de control y monitoreo de corriente los dos dentro de sus cajas, además de que también se observa a la izquierda el primer BMS construido para esta fórmula, mientras que en la Figura 4.20 se muestra el interior de una sección de la etapa de potencia, donde se ven algunos de los componentes colocados en arreglo junto a su disipador y el filtro colocado para disminuir el ruido debido a la bobina.



Figura 4.20: Interior del controlador V5 para motor de 8 [HP].

De este desarrollo tanto del prototipo experimental como de la versión 5 funcional, hay que resaltar varios puntos importantes descubiertos durante su implementación, los cuales son de importancia y deben tenerse en cuenta al diseñar y construir un controlador, estas son:

- El cálculo de corriente pico al arranque del motor es de suma importancia ya que sin este valor es muy probable que la electrónica se quemé.
- Es importante evaluar cuánto se van a calentar los elementos durante su uso constante debido a que es un elemento de potencia, la corriente que circula por los elementos calienta los componentes y pueden llegar a fallar.
- Realizar pruebas previas a los circuitos de manera independiente ante situaciones extremas y analizar su comportamiento.
- El ruido en un controlador es sumamente difícil de anular, por lo que nunca se podrá quitar por completo únicamente se puede atenuar.
- Entre mayor potencia, mayor la complejidad del controlador.
- Por toda la experiencia adquirida, se logró plantear un esquema de experimentos mínimos necesarios para que un controlador funcione, así como también la secuencia necesaria para ubicar los problemas en el circuito.

#### 4.1.6. Controlador para motor de DC 1 HP



Figura 4.21: Controlador V6 colocado junto al motor de 1 [HP].

Posteriormente al controlador V5, se diseñó un nuevo controlador para la fórmula Shell, esta vez es un controlador para un motor de DC a 1 [HP] de potencia el cual tiene la función de mover el auto que participó en la competencia de Shell Eco Marathon en el 2014 (Figura 4.21).

Tomando como base la experiencia adquirida en las versiones anteriores, este controlador resulta mucho más sencillo de diseñar y fabricar ya que el voltaje y la corriente con los que se están trabajando son inferiores a los que ya se han trabajado, este motor trabaja a 48 [V] y 15 [A] características muy similares al controlador del motor brushless de 5 fases, pero a una corriente inferior.

En la Figura 4.22 se muestra el interior del controlador diseñado para el motor de 1 [HP], en este controlador se refinó lo aprendido en las versiones anteriores y se tomaron en cuenta los puntos mencionados en la V5.

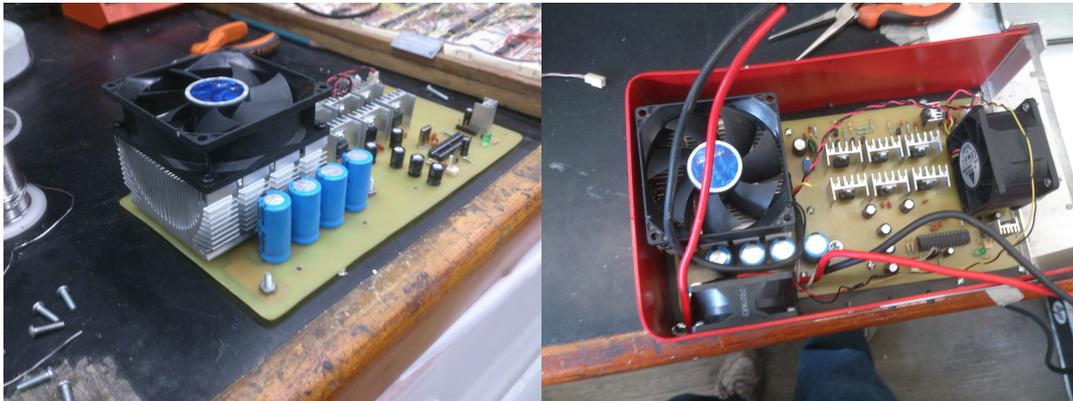


Figura 4.22: Interior del controlador V6.

Los puntos importantes a resaltar de este diseño son:

1. La carga de la bobina se distribuye en diferentes componentes de tal forma que se reduzca la cantidad de energía que circula por cada uno, además de proteger la electrónica ante sobre cargas con diodos y un sistema de filtro Snubber (para más información sobre el funcionamiento del Snubber en la electrónica de potencia, se puede revisar el trabajo de tesis “**Actualización de una máquina CNC por corte Láser**” en la sección 3.5 ) calculado para el controlador de este motor.
2. El circuito regulador de corriente mantiene dentro de los rangos de operación a la electrónica evitando que se queme por un exceso de corriente.
3. El controlador posee un ventilador que permite distribuir el flujo de aire a lo largo de la etapa de potencia y evitando que se calienten los disipadores, aunque en la imagen se

muestra que el controlador tiene tres ventiladores, una vez que se ha cerrado (Figura 4.21) dos de estos ventiladores se han retirado ya que no fueron necesarios.

4. Se tiene un filtrado de la bobina tanto con filtros de entrada, así como dentro de la misma conmutación, reduciendo considerablemente la posibilidad de inestabilidad al conmutar la bobina.
5. Con el control de corriente, cálculo de pistas, distribución de componentes y colocación de filtros, el controlador se comporta de manera estable ante la conmutación de la bobina.

El único problema que se detectó en este controlador no es en la cuestión electrónica, si no va más dirigido a la protección del motor, ya que la electrónica suministra la energía necesaria al motor para funcionar, el controlador la proporciona, pero si el motor se mantiene en un uso constante y debido a la falta de ventilación en el motor, este se calienta de una manera excesiva, debido a los requerimientos de la Fórmula Shell, el tiempo que está encendido el motor no es mayor a 60 min, y se realizaron pruebas durante 1.5 horas por lo que para este propósito es adecuado, pero para otro tipo de aplicaciones es necesario colocar un sensor de temperatura en los motores, para evitar que se quemara por sobrecalentamiento.

Antes de proseguir con este trabajo es **importante resaltar el hecho de que estos no son los únicos controladores para motores que se han diseñado y construido**, existen otras versiones para motores de pasos, motores de corriente alterna y motores de corriente directa, solo **en este trabajo se muestran los diseños más representativos**, de los cuales se obtuvieron los mayores avances en el diseño de controladores, así como también los que generaron la mayor experiencia experimental, **para llegar a este desarrollo de controladores se ha recorrido un largo proceso de pruebas, fallos, aprendizaje y experimentación**, desde el primer controlador fabricado en la licenciatura, el primer controlador de mayor potencia (mostrado en el trabajo “Actualización de una Máquina CNC por corte Láser”), hasta el controlador diseñado para éste trabajo, la experiencia es de 10 años a la fecha de este trabajo, por lo que se ha revisado mucha documentación y realizado experimentación durante un largo tiempo con diferentes versiones y circuitos electrónicos para llegar a este último diseño.

#### 4.1.7. Controlador para motor brushless de 3 fases a 1000 [W]

Finalmente con los controladores construidos hasta este momento, partimos a desarrollar el controlador final, el cual será la base de todos los controladores de los vehículos construidos, este controlador es para un motor brushless de 3 fases a 1000 [W], dicho motor se muestra en la Figura 4.23, este será el motor que se empleó para la Formula Shell Eco Marathon del 2017 en Rio de Janeiro Brasil y el 2018 en San Francisco California Estados Unidos, en el auto prototipo Kalani mostrado con anterioridad en este mismo trabajo.



Figura 4.23: Motor brushless de 3 fases a 1000 [W].

En este punto del trabajo de tesis es importantes resaltar los parámetros de diseño de la electrónica para cada uno de los vehículos, ya que, aunque los motores son muy parecidos, sus rangos de trabajo son diferentes, por lo que se deben tener presentes al hacer su diseño, por lo que dichas características se muestran a continuación:

#### ■ Vehículo Prototipo V1

- Motor: Un motor brushless de 3 fases con sensores de efecto hall a 1000 [W] y 48 [V].
- Voltaje de batería: 48 [V] nominales 56 [V] máximo.
- Corriente: 10 [A] continuos, 120 [A] pico.

#### ■ Vehículo Urbano

- Motor: Dos motores brushless de 3 fases con sensores de efecto hall, cada motor trabaja a 1000 [W] y 48 [V].
- Voltaje de batería: 48 [V] nominales 56 [V] máximo.
- Corriente: 10 [A] continuos, 120 [A] pico.

Con estas características partimos a diseñar, se puede observar primeramente que todos los controladores trabajarán a 48 [V] nominales, por lo que ese rango de voltaje queda delimitado en el diseño, lo que varía en cada uno de los motores es la potencia debido a la corriente que consumen, por lo que para tener el diseño de cada uno de los controladores es suficiente con tener uno de los diseños funcionando y escalar la potencia del mismo, cosa que ya se ha realizado en otros diseños previos, así como también el control de un motor más complicado en cuestión de conmutación como lo es el motor brushless de 5 fases a 1000 [W].

Así como también de los modelos anteriores, se tienen circuitos y pruebas realizadas a diferentes circuitos de conmutación y de control de corriente, todos estos desarrollos sirven de base para realizar un único diseño general para todos los vehículos y escalar la electrónica sin muchos problemas, pero sin la experiencia adquirida de los controladores anteriores, la forma más fácil de resolver este diseño sería empezar con el controlador de mayor potencia y escalar la electrónica a los motores más pequeños.

Con base en lo anterior explicado se empieza el diseño del controlador, el caso que se estará trabajando es para el motor de 1000 [W], esto porque es el motor que más se emplea en los diseños, además de que no es el de mayor potencia ni el de menor se encuentra en un término medio, este controlador es el que se emplea en el vehículo prototipo V1.

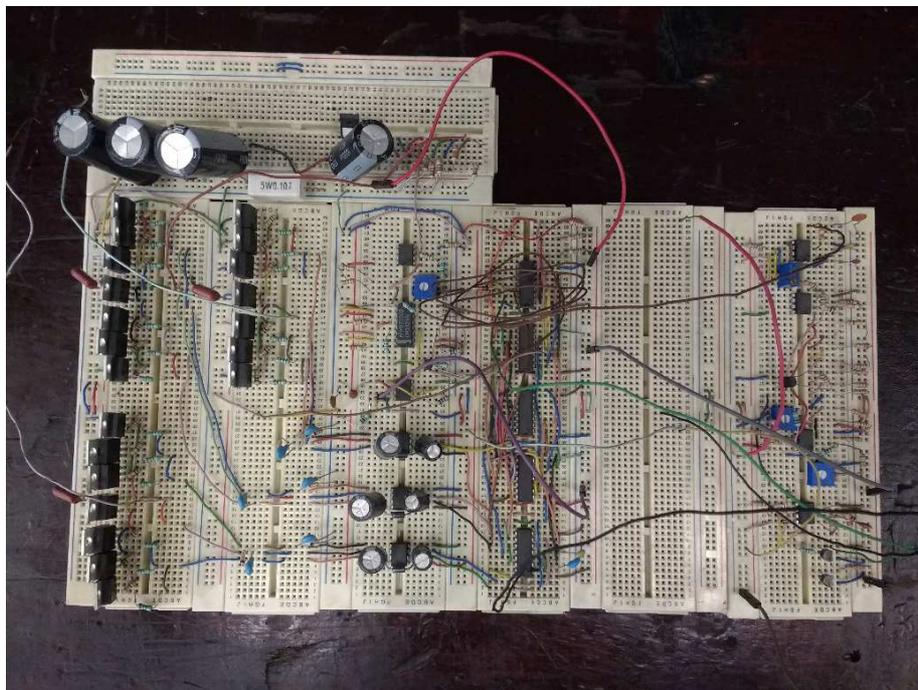


Figura 4.24: Controlador en protoboard para motor brushless de 3 fases.

Para facilitar la implementación de todos los controladores en todos los vehículos se decide realizar el diseño seccionado, es decir, dividir el circuito principal en varios circuitos tal y como se explicó al inicio de este capítulo, pero agregando dos nuevas tarjetas, estas con la finalidad de tener la posibilidad de intercambiar ciertas funciones del controlador, estas dos tarjetas son la de regulación de voltaje y otra que realizará la función de cerebro en la cual se podrá colocar programación de control para obtener mejor eficiencia.

En la Figura 4.24 se muestra este primer diseño fabricado en protoboard, los circuitos presentes en este circuito son el de potencia, conmutación, control de corriente, regulación y el cerebro.

El diseño se inicia en protoboard para poder observar el comportamiento del circuito ante diferentes configuraciones, buscando la mayor estabilidad posible del mismo ya que debido a la potencia a la que se está trabajando el ruido presente en el circuito es considerable, además de que la corriente que atraviesa los componentes de potencia de manera continua pueden causar que fallen por temperatura, por lo que es importante observar su comportamiento, después de realizar pruebas de funcionalidad y corroborar el funcionamiento se observó que el circuito requería una mayor estabilidad en cuestión de temperatura, pero para esto también era conveniente llevar el controlador a un extremo de operación, cosa que no sería posible realizar en una protoboard, por lo que se prosiguió a realizar el diseño en una tarjeta perforada que únicamente serviría de pruebas.

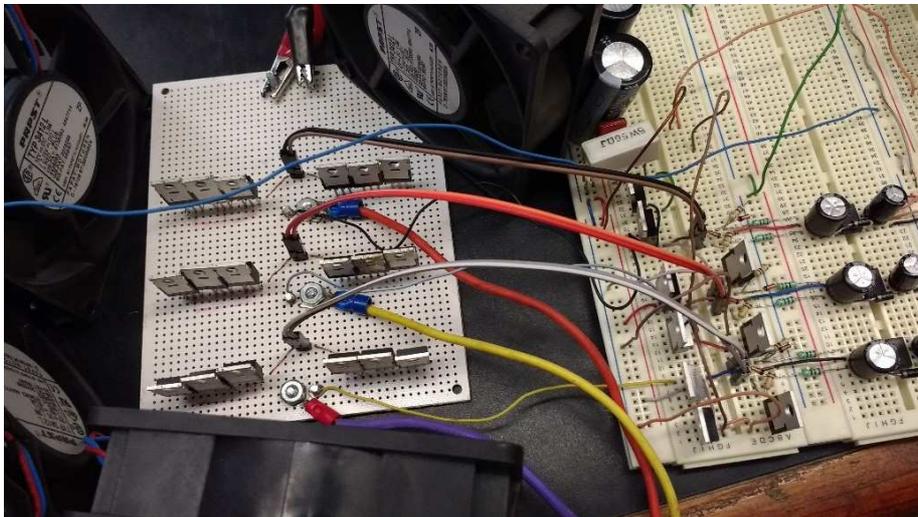


Figura 4.25: Controlador en protoboard y en placa fenólica .

En la Figura 4.25 se muestra el controlador con el cambio en la etapa de potencia, las pruebas realizadas a este controlador debido al cambio de la tarjeta de potencia en una placa fenólica pueden ser más exigentes ya que la corriente que puede circular por las pistas es mayor que la

de una protoboard, con esto en mente se plantean los experimentos a realizar los cuales deben cumplir ciertos resultados esperados para así poder considerar que el controlador aguantará las exigencias mínimas, antes de realizar pruebas sobre un vehículos, estos experimentos y sus requerimientos esperados se describen a continuación.

## Experimentos

### 1. Conmutación.

#### a) Adquisición de sensores.

Revisar la adquisición de los sensores de efecto hall por parte de la electrónica.

#### b) Secuencia de conmutación.

Una vez recibida la señal del sensor de efecto hall, verificar que el circuito de conmutación mande la salida correspondiente a la secuencia para activar el giro del motor en una dirección.

#### c) Circuito de conmutación.

Verificar que el circuito de conmutación mande el voltaje y la secuencia adecuada a la etapa de potencia.

### 2. Control de corriente.

Realizar pruebas de funcionalidad del circuito de corriente (comportamiento de la salida de control de la corriente) ante diferentes rangos de operación, máxima corriente, mínima corriente y respuesta ante la entrada de control de velocidad.

### 3. Regulación de voltaje.

Revisar que el circuito de regulación soporte el voltaje de entrada Máximo (56 [V]), que regule el voltaje a los rangos que se emplearán en todo el controlador y verificar estabilidad ante una carga constante.

### 4. Ruido.

#### a) Circuito de conmutación.

Verificar que, una vez que el motor esté accionado, el ruido presente en la conmutación sea mínimo, permitiendo activar y desactivar la bobina.

#### b) Circuito de potencia.

Cuando el motor esté funcionando (girando en un sentido), revisar que el ruido generado por la bobina no afecte a la etapa de potencia, lo único que debe ocurrir en el circuito debe ser la conmutación.

c) Cerebro.

Una vez accionada la bobina, el retorno de corriente afecta a todo el circuito, por eso la importancia de los filtros y el control del ruido, este ruido afecta de igual manera al cerebro del controlador, y si es demasiado puede ocasionar que el circuito deje de funcionar, afectando todo el control del motor.

d) Circuito de control de corriente.

Debido al ruido de la bobina y como este circuito está directamente involucrado en el control del motor, si el ruido presente es mayor al filtrado y esperado en el diseño, el control de corriente puede medir valores que no son correctos, causando que la potencia se caliente y llegue a fallar.

5. Estabilidad.

a) Circuito de conmutación.

Una vez accionado el motor, se revisa la estabilidad en la conmutación ya que está involucrado tanto la secuencia de acción en cada bobina como el control de la corriente.

b) Circuito de potencia.

Se prueba que el circuito de potencia responda ante la conmutación y un funcionamiento constante del motor, permitiendo que funcione dentro de unos parámetros de ruido, el cual no es posible quitar en su totalidad.

6. Estabilidad del control de corriente.

Al ser uno de los circuitos principales es importante verificar el correcto funcionamiento de este circuito, por lo que ante unos parámetros de ruido, así como sus rangos de operación debe mantener una estabilidad en la salida de control del circuito, ya que si falla, el circuito puede llegar a quemarse por una mala medición.

7. Calentamiento.

a) Circuito de regulación.

Debido a que el circuito de regulación es el que se encarga de suministrar la energía a la electrónica, este sufre calentamiento debido a la carga que transita sobre él, por lo que es importante verificar que con la carga de operación el circuito funcione sin un calentamiento excesivo (dentro de los parámetros de los componentes).

b) Circuito de Potencia.

Sobre este circuito pasa toda la corriente del motor, por lo tanto, es el circuito que tiene la mayor carga de todo el controlador, por lo que es inevitable que la etapa de potencia se caliente, lo que se verifica es que los componentes trabajen dentro de sus rangos de operación.

#### 8. Etapa de potencia.

##### a) Prueba de funcionamiento.

Con los circuitos integrados, se prueba que se obtengan las señales de salida esperadas en cada situación de operación.

##### b) Prueba de duración.

Con el motor girando en un sentido se deben realizar diferentes pruebas de duración, las cuales son mantener el motor encendido a diferentes cargas y diferentes velocidades, esto con el fin de asegurar que la electrónica no fallará en los periodos de utilización pensados.

#### 9. Estabilidad de la potencia.

Debido a que todos los circuitos tienen el objetivo de accionar el motor, y que todos trabajan en conjunto para este fin, es importante verificar que una vez accionado la electrónica de potencia que es el circuito que se conecta directamente con las bobinas, se comporte de manera estable, es decir que reciba las señales correspondientes de cada circuito y que las ejecute de la manera correcta durante un periodo de funcionamiento.

Todas estas pruebas tienen el propósito de verificar el correcto funcionamiento del controlador al conectar al motor sin una carga y con carga, además de que no solo nos dan las herramientas de conocer mejor el circuito diseñado, sino que también, ayuda a identificar fallas que no se tengan previstas en el controlador, lo cual facilitan la evolución del desarrollo de este tipo de electrónica.

Con las pruebas planteadas, se prosigue a realizar las pruebas al circuito, cuyos resultados se mencionan a continuación.

### Resultados 1

#### 1. Conmutación.

##### a) Adquisición de sensores.

Al conectar los sensores y hacer girar el motor, se comprobó que se tenía lectura de cada sensor.

##### b) Circuito de conmutación.

Con los sensores leídos de manera correcta, y al hacer girar el motor se comprobó que la secuencia mandada era la esperada en el diseño.

##### c) Secuencia de conmutación.

El voltaje con el que se manda cada señal del circuito de conmutación se encuentra dentro de los rangos de diseño.

## 2. Control de corriente.

Al hacer la simulación de una carga sobre el circuito, este se llevó a su rango máximo de operación, demostrando que el circuito cortaba la corriente.

Mientras que, al llevar al circuito a su valor mínimo, el circuito de corriente permitía el paso completo de la corriente, lo cual también está dentro de lo esperado para este circuito.

Posteriormente se comprobó la respuesta con la señal de control de velocidad, llevando al circuito a diferentes rangos de corriente, tanto los máximos como mínimos y valores intermedios, observando en el osciloscopio su funcionamiento, se concluyó que el circuito funcionaba como debía.

## 3. Regulación de voltaje.

Empleando una fuente controlada en corriente y variando el voltaje, se comprobó que el circuito provee los voltajes de trabajo, así como también que soporta el voltaje máximo de entrada de 56 [V] proveniente de las baterías.

## 4. Ruido.

### a) Circuito de conmutación.

Con el motor funcionando a diferentes velocidades y diferentes cargas se logró verificar la respuesta del circuito de conmutación y su comportamiento ante el ruido presente en el circuito, de esta prueba se logró determinar que el circuito de conmutación era capaz de soportar el ruido presente en estas pruebas, por lo que se procedió a realizar la siguiente prueba.

### b) Circuito de potencia.

Se comprobó que el circuito de potencia era lo suficientemente robusto para soportar el ruido de la bobina, es decir, que al accionar el motor la potencia no se quemara y que la secuencia de conmutación fuera accionada de manera correcta, así como el control de la corriente.

### c) Cerebro.

Con las bobinas funcionando, se revisó el amortiguamiento del ruido sobre la tarjeta cerebro, revisando que los picos generados no causaran un fallo de funcionamiento, el resultado fue que el filtro colocado se encuentra en los límites de funcionamiento ya que existieron casos en los cuales el filtro no era suficiente para evitar que esta tarjeta fallara.

### d) Circuito de control de corriente.

Al igual que con los circuitos anteriores, se comprobó la resistencia de este circuito con las bobinas funcionando, se pusieron a prueba los filtros y los rangos de operación y al igual que con el cerebro esta tarjeta se encuentra al límite en reducción de ruido pero a diferencia de la tarjeta cerebro, esta tarjeta no se ve tan afectada, por lo que

su funcionamiento únicamente cambia en los rangos máximos de corriente permitida, por lo que este valor se reajustará a la necesidad.

5. Estabilidad.

a) Circuito de conmutación.

Al accionar el motor se genera una gran cantidad de ruido debido a las bobinas y entre los principales puntos que se ven afectados por este ruido es el circuito de conmutación, ya que es el que recibe las señales de los demás circuitos y las dirige al de potencia, al realizar la prueba con el motor funcionando, se observó que el circuito se comporta bien, a excepción de cuando ocurre un fallo en la tarjeta cerebro, pero este fallo es debido a otra tarjeta lo que permite concluir que el circuito soporta el ruido presente.

b) Circuito de potencia.

Con el circuito de conmutación comprobado, solo queda verificar que la potencia sea capaz de soportar el ruido, para esto se enciende el motor y se hace girar, al observar las señales en el osciloscopio se observa que las señales recibidas del circuito de disparo son correctas, y la presencia de ruido no causa ningún fallo en los componentes.

6. Estabilidad del control de corriente.

Como se ha mencionado, es uno de los circuitos más importantes por lo que debe pasar diversas pruebas, en este caso, debe soportar una corriente constante en presencia de ruido, para esto se enciende el motor y se deja funcionando por periodos de tiempo, observando las señales de salida así como la temperatura a la cual está operando el circuito, después de estas pruebas se concluye que el circuito tiene la capacidad de soportar la corriente de operación de este motor pero que será necesaria una revisión para un motor de mayor potencia.

7. Calentamiento.

a) Circuito de regulación.

Al verificar que el circuito funciona con los voltajes de operación se prosigue a revisar con una carga, para esto se le conecta a cada voltaje de operación su circuito y se observa que, aunque el circuito soporta un tiempo de operación, para tiempos largos requiere de disipadores para asegurar su funcionamiento continuo.

b) Circuito de Potencia.

En este caso y a diferencia del circuito de regulación se sabe que debido a la carga que estará circulando por el circuito este se va a calentar, en este caso se debe determinar que tipo de sistema de enfriamiento se requiere, para las pruebas iniciales se decidió utilizar disipadores para cada sección del circuito así como un ventilador para así

asegurar que no fallará, en estas primeras pruebas esta solución funcionó sin mucho problema, teniendo en cuenta que el flujo de aire no estaba dirigido correctamente, se puede asumir que el controlador podría llegar a funcionar sin ventiladores, pero es necesario realizar más pruebas para llegar a esta conclusión.

#### 8. Etapa de potencia.

##### a) Prueba de funcionamiento.

Indirectamente esta prueba se va realizando en paralelo con las demás, ya que, sin el funcionamiento correcto del motor, las demás pruebas habrían fracasado.

##### b) Prueba de duración.

Esta es una de las pruebas más tardadas y difíciles de determinar en potencia, ya que el ingeniero que está desarrollando el controlador debe tener la capacidad de discernir cuanto tiempo es necesario en cada prueba así como bajo qué condiciones someterá al controlador, una falla en esta prueba puede causar que el circuito de potencia se quemé así como también los demás.

Es una prueba que depende en gran medida del grado de experiencia que tenga la persona que la realiza y ya que en este trabajo el desarrollar esta prueba no es un objetivo se toma como base para realizarla, la experiencia adquirida a lo largo del tiempo.

El resultado de la prueba después de estar realizando diversas combinaciones con carga, sin carga además de diferentes velocidades, niveles de ruido y temperaturas, se llega a la conclusión de que es necesario realizar pruebas más rigurosas ya que las pruebas realizadas las pasó adecuadamente, pero para llevarlas a cabo es necesario fabricar las tarjetas fenólicas ya que en protoboard no es posible realizarlas, pero en este punto el circuito funciona adecuadamente.

#### 9. Estabilidad de la potencia.

Esta es la prueba final, con la cual se corrobora el correcto funcionamiento de todos los circuitos en conjunto, si no existe una estabilidad en el circuito de potencia se puede deber a la falla en algún otro circuito, así como también el tener un resultado inadecuado en alguna de las pruebas anteriores, los resultados de una buena estabilidad se observan al hacer funcionar el motor, que gire y responda como se espera así como también que a lo largo de un periodo, la potencia permanezca muy similar a su estado inicial, sin sufrir perturbaciones por temperatura o ruido.

Con los resultados obtenidos durante las primeras pruebas experimentales de este controlador, se prosiguió a realizar un rediseño, principalmente para realizar pruebas más exigentes en el vehículo de pruebas (estas pruebas se realizan de manera estática con carga sobre el vehículo)

se fabricaron las tarjetas electrónicas (Figura 4.26) y posteriormente se volvieron a realizar las pruebas experimentales planteadas con anterioridad.

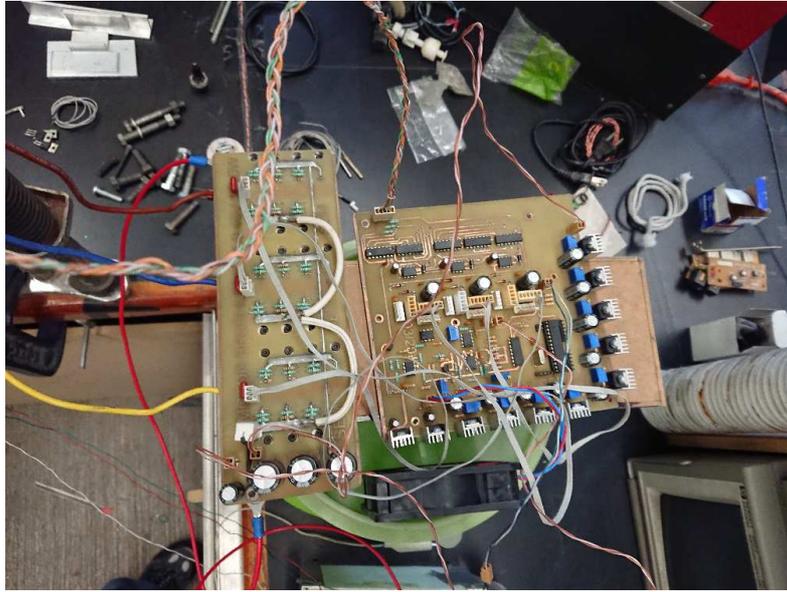


Figura 4.26: Controlador V7.

## Resultados 2

### 1. Conmutación.

#### a) Adquisición de sensores.

Al igual que en el caso anterior al conectar los sensores y hacer girar el motor, se comprobó que se tenía lectura de cada sensor.

#### b) Circuito de conmutación.

El circuito de conmutación funcionó de manera adecuada al hacer girar el motor de manera manual.

#### c) Secuencia de conmutación.

El voltaje de salida del circuito de conmutación es el correcto.

### 2. Control de corriente.

Al hacer la simulación de una carga sobre el circuito, este se llevó a su rango máximo de operación, demostrando que el circuito cortaba la corriente. Por los resultados obtenidos en el caso anterior este circuito se modificó debido a que el límite de corriente en su punto superior era diferente al diseñado.

Al llevar el circuito a su valor mínimo, el circuito de corriente permitía el paso completo de la corriente.

Posteriormente se comprobó la respuesta con la señal de control de velocidad, llevando al circuito a diferentes rangos de corriente, tanto los máximos como mínimos y valores intermedios, observando en el osciloscopio su funcionamiento, el cual es correcto.

### 3. Regulación de voltaje.

El circuito soporta un voltaje de entrada de 56 [V] y regula de manera adecuada cada uno de los voltajes de operación del controlador.

### 4. Ruido.

#### a) Circuito de conmutación.

Con el motor funcionando a diferentes velocidades y diferentes cargas se logró verificar la respuesta del circuito de conmutación y su comportamiento ante el ruido presente en el circuito, se logró determinar que el circuito de conmutación es capaz de soportar el ruido presente en estas pruebas.

#### b) Circuito de potencia.

Como se realizaron pruebas previas a esta, se logró disminuir el ruido en esta etapa, principalmente por el cambio de sistema de pruebas, el primero era en protoboard, lo cual generaba ruido alrededor de la etapa de potencia, pero al pasar los circuitos a una tarjeta fenólica, el sistema se comporta mejor.

El circuito de potencia es lo suficientemente robusto para soportar el ruido de la bobina, es decir que al accionar el motor la potencia no se quemará, además la secuencia de conmutación fue accionada de manera correcta, así como el control de corriente.

#### c) Cerebro.

Al igual que en el caso anterior, al pasar el circuito a una tarjeta fenólica, el ruido se ve disminuido, pero por los resultados de la versión anterior se realizaron unos cambios en el filtrado, ya que los componentes son susceptibles al ruido y en la versión anterior se encontraba al límite.

Al igual que en la prueba anterior, con las bobinas funcionando, se revisó el amortiguamiento del ruido sobre la tarjeta cerebro, revisando que los picos generados no causaran un fallo de funcionamiento, el resultado fue que el filtro colocado amortigua el ruido, lo suficiente para que la tarjeta sea estable en su funcionamiento.

#### d) Circuito de control de corriente.

Se comprobó la resistencia de este circuito con las bobinas funcionando, se pusieron a prueba los nuevos filtros y los rangos de operación y al igual que con el cerebro esta tarjeta se encontraba al límite en su versión anterior por lo que los filtros fueron

cambiados y así no llevar al límite esta tarjeta (aunque no se ve muy afectada por los ruidos, se decidió cambiar los filtros y así asegurar que su señal de control sea estable), y con los cambios realizados a este circuito su comportamiento es más controlado que en el anterior.

#### 5. Estabilidad.

##### a) Circuito de conmutación.

Al accionar el motor y observar el comportamiento de las señales de conmutación se concluyó que su respuesta, aunque con ruido, era aceptable ya que no afectaba el comportamiento del motor.

##### b) Circuito de potencia.

Con el circuito de conmutación comprobado, solo queda verificar que la potencia sea capaz de soportar el ruido, para esto se enciende el motor y se hace girar, al observar las señales en el osciloscopio se observa que las señales recibidas del circuito de disparo son correctas, y la presencia de ruido no causa ningún fallo en los componentes, de hecho, el ruido presente es menor al caso anterior.

#### 6. Estabilidad del control de corriente.

Como se ha mencionado es uno de los circuitos más importantes por lo que debe pasar diversas pruebas, en este caso debe de soportar una corriente constante en presencia de ruido, para esto se enciende el motor y se deja funcionando por periodos de tiempo, observando las señales de salida así como la temperatura a la cual está operando el circuito, después de estas pruebas se concluye que el circuito tiene la capacidad de soportar la corriente de operación de este motor.

#### 7. Calentamiento.

##### a) Circuito de regulación.

Como esta parte ya se revisó con anterioridad, únicamente es comprobar que el circuito repita su función, al conectarlo con carga y sus disipadores se observó que el circuito funciona adecuadamente en periodos largos, pero solo si se colocaba ventilador.

##### b) Circuito de Potencia.

A diferencia del caso anterior, esta parte es la principal a probar en este nuevo experimento, ya que se pueden realizar pruebas más exigentes al circuito.

Del caso anterior sabemos el comportamiento de este circuito ante diferentes cargas y diferentes tiempos, por lo que es posible saber cuánto se calienta el circuito, para esto se colocan barras de disipación de aluminio por cada una de las fases.

Uno de los principales aspectos a tomar en cuenta en este diseño de PCB es que se colocaron los componentes de tal forma que permitieran agregar disipadores, resultado de la prueba anterior se colocaron por cada sección de la bobina, separando los componentes por función al momento de activar una bobina.

Al realizar las pruebas con diferentes cargas se observó que los disipadores tenían la capacidad de distribuir el calor de buena manera incluso la tarjeta tenía la capacidad de funcionar sin un flujo de aire.

#### 8. Etapa de potencia.

##### a) Prueba de funcionamiento.

Indirectamente esta prueba se va realizando en paralelo con las demás, ya que, sin el funcionamiento correcto del motor, las demás pruebas habrían fracasado.

##### b) Prueba de duración.

Como se ha dicho con anterioridad esta es una de las pruebas más tardadas y difíciles de determinar en potencia, ya que el ingeniero que está desarrollando el controlador debe tener la capacidad de discernir cuanto tiempo es necesario en cada prueba, así como bajo qué condiciones someterá al controlador, una falla en esta prueba puede causar que el circuito de potencia se queme, así como también los demás.

Como los circuitos ya se encuentran en tarjetas es posible realizar pruebas exigentes al circuito sin el temor de que las protoboards causen un efecto inesperado, por lo que en este caso las pruebas se realizan bajo una carga de 60 kg más el peso del vehículo de pruebas.

La primera prueba es a baja velocidad, limitando la corriente para que la potencia no se queme y se deja funcionando durante 10 min, al observar que el circuito soporta el funcionamiento se prosigue a llevar la velocidad del motor a una velocidad media (para la competencia únicamente se requieren 40 km/h), al dejar funcionando el motor durante el mismo periodo se concluye que el circuito está listo para funcionar a la velocidad máxima, pero para esta prueba se va escalando el tiempo, por el comportamiento del controlador se decide ir subiendo los tiempos de 5 min en 5 min, partiendo de 5 min hasta 30 min de funcionamiento continuo, y observar la temperatura así como el comportamiento de toda la electrónica en conjunto.

El resultado de esta prueba es que el controlador es lo suficientemente robusto para funcionar al menos 60 min, tiempo suficiente para la competencia.

#### 9. Estabilidad de la potencia.

Esta es la prueba final, con la cual se corrobora el correcto funcionamiento de todos los circuitos en conjunto, al pasar los circuitos a una tarjeta, el comportamiento del motor es mejor ya que las protoboards por el tipo de conexión generan ruidos, pero en este punto

se puede decir que el controlador funciona para la competencia, aunque es posible mejorar el tamaño del circuito.

Aunque las pruebas hasta este punto han sido satisfactorias, se puede ver que el tamaño del controlador se puede disminuir, y esto es principalmente en el diseño de la PCB.

**Una vez terminadas estas pruebas se procede al diseño final del controlador, el cual formará parte del vehículo prototipo Kalani que estará compitiendo en Shell Eco Marathon 2017 en Brasil y 2018 Estados Unidos, este diseño final se tratará con más detalle en el siguiente capítulo.**

## 4.2. Diseño general del BMS

Como se ha visto con anterioridad un BMS o sistema de monitoreo de batería es fundamental ya que es el encargado de revisar el estado de las baterías de litio que estarán en cada uno de los vehículos, así como la protección de las mismas.

Para su diseño lo primero que debemos tomar en cuenta es la capacidad que tendrá el banco de batería, ya que con este voltaje se definen los elementos y el arreglo que se estará utilizando para el monitoreo del banco de baterías, como se a dicho, el voltaje de trabajo es de 48 [V] con diferentes capacidades de corriente esto debido a que los vehículos emplean diferentes potencias para su funcionamiento.

Con esta base empezamos el diseño del BMS, pero para que este completo no solamente necesitamos medir el voltaje si no también la corriente y temperatura esto para evitar dañar las baterías de litio.

Para el diseño del banco se sabe que la baterías utilizadas son 18650 de litio a 2950 miliamperios, este es uno de los parámetros que se utilizan como referencia para el diseño del BMS, la temperatura a la cual estará trabajando el BMS la obtenemos de la investigación realizada y mostrada en la tabla 4.1, la cual nos dice los parámetros de las baterías que estaremos utilizando, entre estos parámetros el que nos interesa son los rangos de temperatura a la cual funcionan las baterías, este dato será crucial en el diseño del BMS, para la medida de la temperatura empleamos termistores caracterizados, esto debido a su sensibilidad y fácil utilización.

Adicionalmente a la temperatura, también necesitaremos medir la corriente de entrada y salida del banco de baterías, la cual está definida por el tamaño del banco a emplear, para estas versiones empleamos un sensor de 30 [A] de efecto hall, este sensor se elige por lo fácil que es

encontrarlo en México, el costo que tiene y el rango de trabajo que es suficiente para todos los sistemas de monitoreo.

NOMBRE	BATERIA DE NCR I8650A 3100MAH
Capacidad nominal	3100mAh (descarga: 0.2CmA)
Capacidad mínima	2950mAh
Tensión de carga	4.2V (estándar)
Voltaje nominal	3.6V
Método de carga	CC-CV (voltaje constante con la corriente limitada)
Corriente de carga	Carga estándar: 1650mA (recomendación) Carga rápida: 3100mAh
Tiempo de carga estándar	Carga estándar: 3.0hours Carga rápida: 2.5hours
Estándar corriente derivada	620mA
Corriente de Std. Discharge Cut-off	30mA
Voltaje de atajo de la descarga	2.5V
Peso de la célula	máximo 47g.
Corriente del viaje de la protección del PWB	10A (aproximadamente) proteja la batería contra: sobre descarga sobre carga de sobrecalentamiento a baja temperatura cortocircuito
PWB	hecho de la placa de la protección del acero inoxidable de Seiko Voltaje del PWB: 2.5V-4.2V MOS DEL PWB: Versión de 3 MOSFET
Dimensión de la célula	Altura: máximo de 68.90m m. Diámetro: máximo de 18.50m m.
Temperatura de funcionamiento (Ambiente)	Carga: 0 a 45°C Descarga: -20 a 60°C Temperatura superficial de la célula al descargar: Máximo 75°C
Temperatura de almacenamiento	1 año: -20 a 25°C 3 meses: -20 a 45°C 1 mes: -20 a 60°C

Cuadro 4.1: Características de la batería. [R22]

Los momentos principales en los cuales las baterías se llegan a calentar son durante la carga y descarga de las mismas, esto quiere decir que los momentos son mientras se están utilizando el motor o mientras se están cargando el banco, esto nos indica que el sistema de monitoreo de baterías debe tener una carga y descarga controlada para no dañar las baterías (para esta primera versión omitiremos la carga por frenado regenerativo, aunque también se considera carga).

En este punto se tienen tres factores a medir, el voltaje, corriente y temperatura, pero como el BMS no está trabajando solo, si no en conjunto con el cargador y el controlador es recomendable que el sistema de monitoreo BMS se comunique con los sistemas, por lo que además de estos sensores también se requiere de un puerto de comunicación, el cual se conecta con el cargador así como también con el controlador para tener un mejor cuidado de las baterías y así alargar la vida de las mismas.

Antes de empezar el diseño del BMS es necesario hacer un esquema general del mismo en el cual representemos los elementos principales de los cuales estará constituido Figura 4.27.

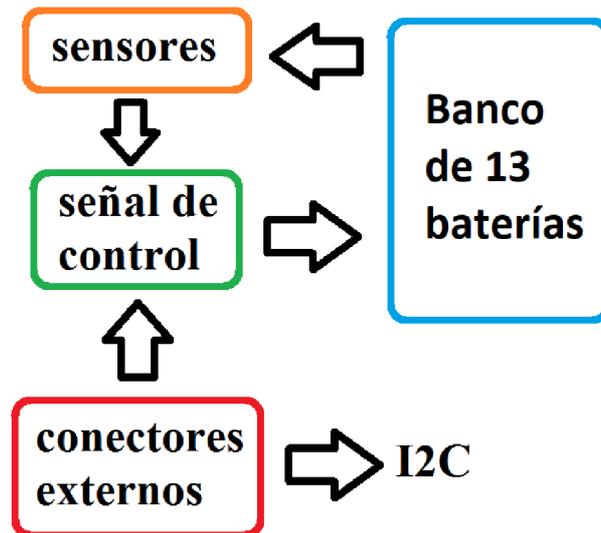


Figura 4.27: Estructura general del BMS.

Con el esquema general realizado, lo siguiente es definir lo que realizará cada uno de los bloques, así como el tamaño del banco de baterías, hemos dicho con anterioridad que se estará trabajando a 48 [V] y se estarán utilizando baterías 18650 de 2950 [mAh], cada una de estas baterías tiene un voltaje nominal de 3.7 [V], para alcanzar el voltaje de 48 [V] es necesario colocar varias en serie, además es importante resaltar que el voltaje máximo al que estas baterías trabajan es 4.2 [V], el cálculo de cuantas baterías necesitamos se muestra a continuación.

$$48 [V] = NB (3.7 [V]) \implies NB = \frac{48[V]}{3.7[V]} \implies NB = 12.97$$

Se observa que para nuestro banco de 48 [V] se necesitan 13 baterías (redondeando), esto nos dice que el voltaje máximo al que estaremos trabajando será de  $13 * 4.2 [V] = 54.6 [V]$ , este dato es importante ya que es el que se utilizará en el diseño de todos los sistemas principales de los vehículos.

Ya con el dato de que cantidad de baterías se utilizarán (13 baterías de ion-litio conectadas en serie) proseguimos a realizar un esquema más detallado de la funcionalidad de cada bloque del BMS, para esto primero detallamos que acción realiza cada bloque del BMS.

- **El bloque de sensores:**

Está compuesto por al menos 13 sensores de voltaje que tomarán los datos del voltaje sobre cada una de las celdas, a su vez el banco de baterías completo tendrá su sensor de temperatura que se encargarán de medir la temperatura de todo el banco y finalmente el sensor de corriente, que medirá la corriente que le entrega el cargador al conjunto de baterías, así como también la corriente que se entrega durante el uso del motor.

- **El bloque de señales de control:**

Es el circuito que toma la medición dependiendo del estado de las baterías, evalúa que tanta carga están recibiendo de parte del cargador, así como también evalúa la cantidad de carga que se proporciona al motor, también estará encargado de las señales de control que conectan o desconectan los interruptores externos dependiendo de las condiciones de voltaje, corriente y temperatura.

- **El bloque de conectores externos:**

Es el encargado de conectar la carga o el cargador a las baterías dependiendo de su estado, también genera una desconexión del conjunto de baterías cuando la temperatura excede el valor o se tenga un valor excedido de corriente, además de que también es donde se tiene representado el conector de la comunicación I2C que proporciona información a un sistema externo.

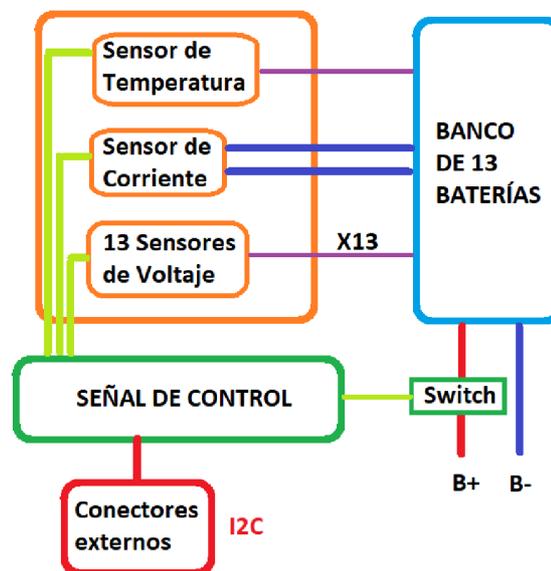


Figura 4.28: Esquema detallado general del BMS.

Con los bloques descritos a mayor detalle, se prosigue a realizar un esquema más detallado el cual se muestra en la Figura 4.28 donde se representa la configuración interna del circuito del BMS sin incluir componentes, ya que solo es para dar la idea general del trabajo que se realizará y así poder guiar la configuración completa del circuito en su funcionamiento.

#### 4.2.1. Sensado de voltaje

Para la generación de las señales de control existentes en el BMS es necesario hacer una medición de los voltajes de cada una de las celdas, ya sea por sobre carga o por tener un voltaje inferior al de trabajo, ya que con esta información el BMS elegirá la decisión a tomar.

Por los voltajes a los que se estará trabajando, se debe realizar un acondicionamiento de las señales ya que el voltaje de cada una de las celdas será conectado al BMS y este voltaje se irá incrementando, es decir en la primera batería se tendrán 3.7 [V], en la segunda 7.4 [V], en la tercera 11.1 [V] y así hasta la última batería la cual tiene un voltaje nominal de 48.1 [V].

Tomando como base para el diseño de este nuevo BMS, se toma la experiencia y el trabajo realizado a lo largo de varios años, uno de los primeros sistemas de monitoreo para baterías se diseñó y construyó para la Formula Shell Eco Marathon del 2013 mostrado en la Figura 4.29 el cual fue probado y validado en dicha competencia.



Figura 4.29: BMS V1 construido para la formula Shell 2013.

**Es importante resaltar que este primer diseño fue realizado en una semana, en la cual también se realizó la manufactura del mismo,** lo cual afectó considerablemente el diseño de la PCB, ya que la tarjeta resultante no tubo un buen acabado en soldadura ni en distribución de componentes, aunque funcionó durante la competencia, no es un prototipo que sirva para una producción.

Excluyendo lo anterior, debido al buen funcionamiento del BMS diseñado para la competencia del año 2013, para el año 2014 se realizó un rediseño del primer BMS (Figura 4.30), no solamente

mejorando el consumo, si no también reduciendo el espacio de la placa y agregando un programa de almacenamiento de información para así ir registrando el comportamiento de las baterías.

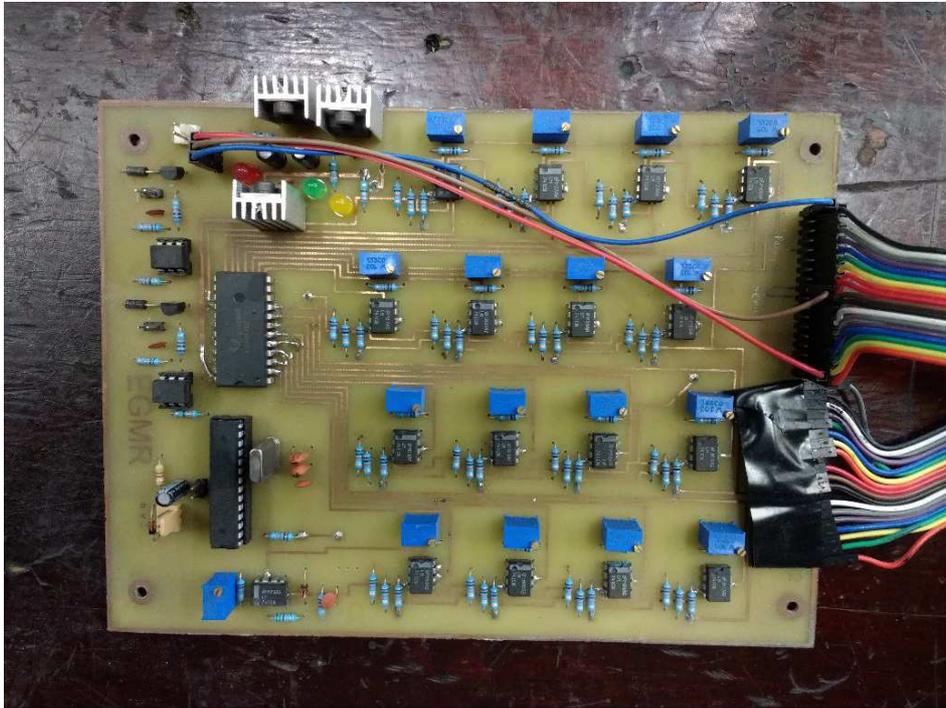


Figura 4.30: BMS V2 construido para la formula Shell 2014.

Para estas dos versiones de BMS se emplearon baterías de diferente empaquetado a las 18650 y de diferentes capacidades, el cual fue un arreglo de 16 baterías en serie que proporcionaban 10 [A] a un voltaje de 48 [V] nominales, lo que indicaba que cada batería proporcionaba alrededor de 3 [V].

Estos dos circuitos presentados en la Formulas Shell, poseen la misma configuración electrónica, empleando amplificadores operacionales como circuito para medir el voltaje.

La diferencia principal entre el BMS V1 y BMS V2 es el tiempo que se tuvo para probarlos en laboratorio. Ya que la versión dos, partes de la base de la versión uno, posee una configuración similar, pero para mejorar al mismo BMS se realizan los cambios que le hicieron falta a la versión uno, de entre los cuales destaca el diseño, es decir se cambió el arreglo para lograr una mayor eficiencia energética, así como también se modificó la forma en que se conectan los elementos, así como el proceso de manufactura.

En la Figura 4.31 se muestra la comparativa entre estas dos primera versiones, lo primero que se nota son los tamaños que tienen, así como el acabado de los dos.

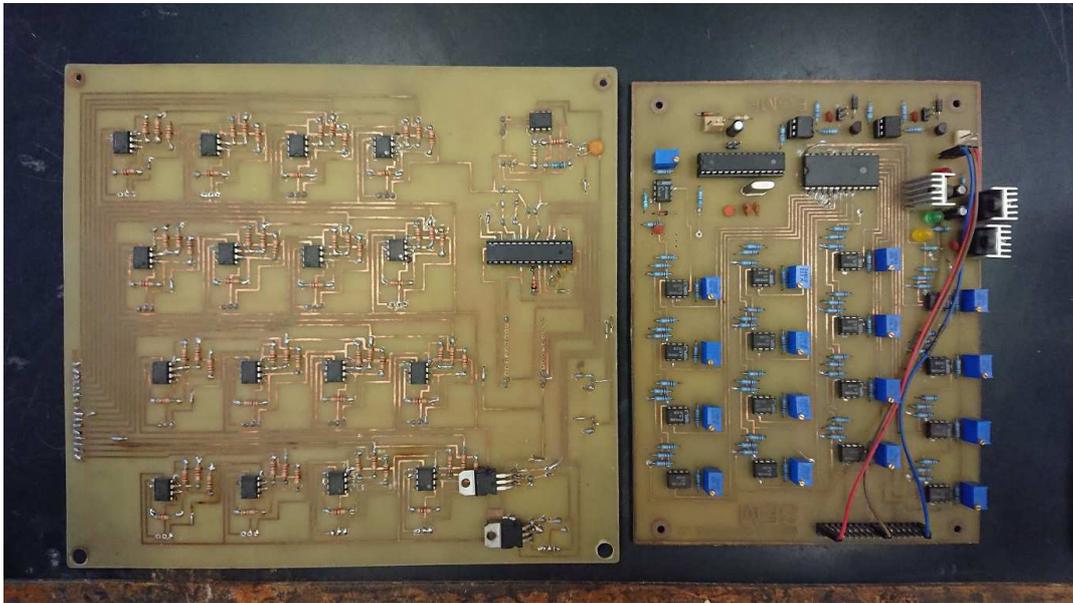


Figura 4.31: BMS V1 VS BMS V2.

Al momento de realizar el diseño del BMS V1, el problema principal a resolver fue el medir el voltaje de un banco de baterías a 48 [V] (excluyendo el poco tiempo del que se dispuso), ya que entre cada batería se va incrementando el voltaje con respecto a la referencia y el circuito se alimenta de esta misma batería, esto nos lleva a ir realizando un proceso de división de voltaje controlado. Para esta versión el voltaje empleado para alimentar al circuito se decidió dividirlo en dos, +24 y -24, solamente por facilidad en la implementación ya que el problema principal a resolver era la medición de cada celda del banco de baterías, posteriormente a la elección del voltaje se realizó la configuración de diferenciador en el amplificador, cuidando que la salida del amplificador no fuera superior al voltaje de la batería, lo cual se consigue con el arreglo de resistencias.

El circuito descrito anteriormente aunque muy simple, para esta primera versión funcionó bastante bien, debido a que se logró obtener la medición de voltaje de las baterías, con el pequeño problema en el valor que arrojaba, el sensor tenía un error de  $\pm 0.3[V]$ , el cual por falta de tiempo no se logró quitar, fuera de ese problema el BMS funcionó de manera muy estable ante la perturbación de la bobina del motor.

En cambio en la versión dos del BMS, por el tiempo del que se disponía así como de la experiencia adquirida de la versión anterior, el error presente en la salida de voltaje se logró reducir a  $\pm 0.1[V]$ . Otro de los cambios que se realizaron en el circuito BMS V2 es el acomodo de los componentes, así como leds que indican el estado del banco de baterías, también en esta versión se agregaron

los interruptores de corte de energía, el cual en la versión anterior se encontraba en un circuito separado.

Aunque también se han realizado y construido diseños de sistemas de monitoreo de baterías que miden el voltaje de manera aislada (Figura 4.32), se decidió emplear los diseños realizados para la Formula Shell, esto debido a que el costo de los componentes es menor así como también la calibración del sensado es más sencilla de realizar por las características del tipo de medición (aislada y directa).

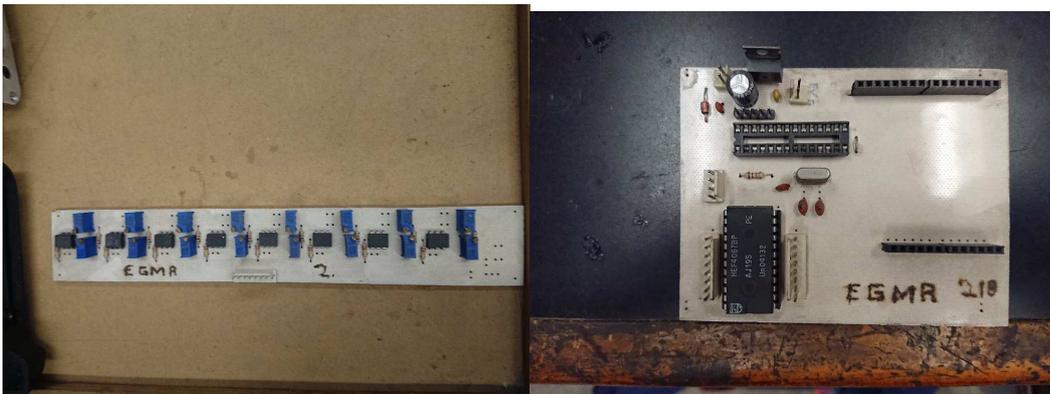


Figura 4.32: BMS de medición aislada.

#### 4.2.2. Sensado de temperatura

Al igual que el voltaje otro parámetro que debe incluir el BMS es la medición de la temperatura, tanto en el BMS V1 como el BMS V2 poseen este sensado en su circuito.

En ambos casos el sensor empleado fue una termoresistencia, la cual va al banco de baterías, durante las pruebas de estas primeras dos versiones, se observó que la temperatura del banco no se incrementaba demasiado, y esto se puede deber al tiempo de uso de las baterías, ya que al ser para la competencia el tiempo en que están activas es muy reducido (60 minutos máximo) de igual manera, el tiempo de carga para la competencia es menor a las dos horas, y bajo condiciones muy controladas.

De los resultados obtenidos así como de la experiencia en las dos versiones construidas, se llegó a la conclusión de que era necesario llevar el sistema a un punto crítico y asegurar que el sistema reaccionara adecuadamente, la forma en que se llevó al sistema en una primera etapa a su punto crítico fue calentando la termo resistencia, hasta que alcanzara un valor alto de temperatura para las baterías, el resultado fue que el BMS tanto de la V1 y V2 realizaron las acciones que

se habían programado con anterioridad lo que nos da el indicio de que el circuito es confiable ante el cambio de temperatura.

Para los dos casos únicamente se empleó un único sensor de temperatura, lo que generó la duda de si en algún momento el banco de baterías se calienta de forma dispareja, es decir que de un extremo al otro del banco la temperatura varía en un rango mayor a  $1[^\circ\text{C}]$ , para asegurar esto, se decide desarrollar un nuevo BMS que sea más flexible, permitiendo la entrada de una mayor cantidad de sensores.

Para esta versión se plantea un sensor de temperatura que mida el ambiente dentro de todo el empaque de baterías, el sensor elegido es el LM35 y tres termo resistencias que se colocarán entre las baterías, pero en los extremos y una en el centro, con este tipo de sensado se espera conocer más el comportamiento del banco, así como también decidir si es necesario la utilización de un sensor o más sensores de temperatura.

Se emplean inicialmente estos tres sensores para realizar únicamente pruebas y asegurar que no se calienten demasiado las baterías, así como también la forma en que se calienta el banco, una vez identificado el punto de mayor calentamiento, se decidirá si permanece esa cantidad de sensores o es necesario reducirlos o aumentarlos.

### 4.2.3. Sensado de corriente

El último de los parámetros que se debe medir adicional al voltaje y a la temperatura es la corriente, ya que influye en la carga y descarga de la batería, al igual que el voltaje y la temperatura de la descripción anterior, el BMS V1 y BMS V2 tienen su sensado de corriente incluido, aunque en las imágenes no se muestran, ya que para estas primeras dos versiones se decidió colocar este sensado fuera del circuito.

En la V1 el sensor que se empleó fue un sensor de efecto hall en forma de dona, mientras que en la V2 el circuito que se empleó fue un sensor de efecto hall pero no de dona, este fue un circuito integrado que abría el circuito, los dos circuitos empleados son sencillos de implementar y no presentan tanto ruido por la bobina del motor, la razón por la que se cambió de sensor entre la V1 y la V2 es que se dejó de fabricar el sensor de dona, por lo que se implementó otro diferente.

Este sensor realizará la medida de la corriente que suministra el cargador o que consume el motor al estar en funcionamiento, esta medición es con el fin de generar una alerta en el caso de que esta supere el valor máximo permitido, para la nueva versión del BMS se plantea utilizar al igual que en las versiones anteriores un sensor aislado por efecto hall.

#### 4.2.4. Generación de señales

En las dos primeras versiones del BMS se empleó un microcontrolador (ATMEGA328P) para generar las señales necesarias de acuerdo a la lectura de cada uno de los sensores, y debido a que en estas versiones el control se logró sin mayor problema para la nueva versión del BMS se empleará el mismo microcontrolador.

Se usarán las salidas digitales para conexión, desconexión, así como también se dejarán todas las terminales disponibles para agregar de ser necesario, en la parte experimental señales ya sean de entrada, salida o que permitan la visualización de indicadores a partir del sensado de voltaje, temperatura y corriente.

Otro punto a tratar en la parte experimental es el tener interruptores lo cuales se proponen como medida de seguridad, para garantizar que las baterías operen dentro del rango de operación de voltaje, corriente y temperatura, de esta manera cuando las baterías se encuentran cargadas se desconecta la carga y cuando se descargan totalmente se conecta el cargador, así mismo también protegerá al banco durante el uso del motor, en las versiones anteriores estos interruptores se encontraban fuera del BMS y en esta nueva versión se evaluará la posibilidad de colocarlos en el mismo circuito.

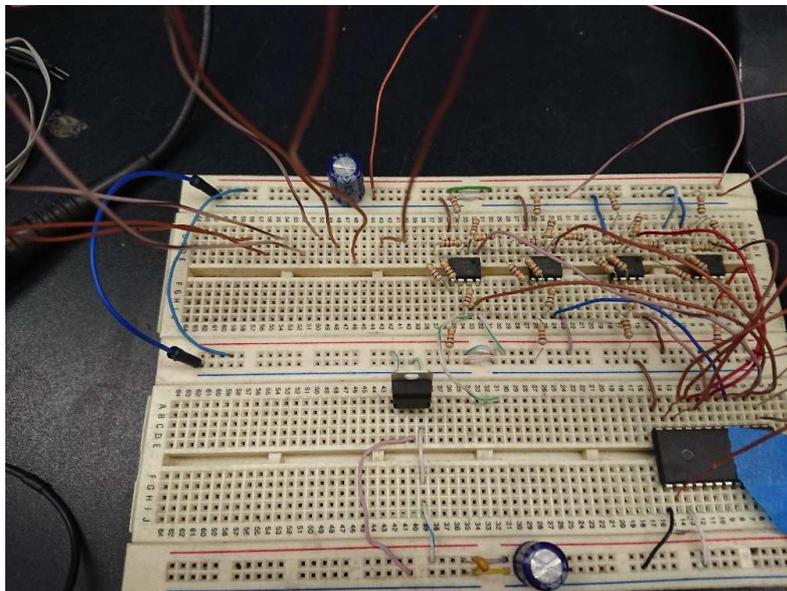


Figura 4.33: BMS versión de prueba.

De igual forma cuando la temperatura aumenta más allá del valor máximo permitido en las baterías, se interrumpe la actividad que se está llevando a cabo (carga o descarga) y espera

a que la temperatura regrese nuevamente a un valor seguro, otro factor es el evaluar a partir de qué punto las baterías se empiezan a cargar y descargar excesivamente para también poder agregar un circuito que regule la energía en lugar de cortarla por completo.

Cómo las baterías son muy sensibles a la carga, descarga y temperatura, las pruebas que se realizan sobre las baterías deben ser muy controladas, ya que podría causar una explosión, con este prototipo de BMS se realizaron pruebas generales de su funcionamiento, asegurando que realizara cortes ante la corriente, con voltajes superiores e inferiores a los límites estipulados, así como también a la temperatura, el resultado para esta primera versión fue que el BMS realizó las acciones correspondientes por lo que se prosiguió a realizar una nueva versión del mismo el cual se muestra en la Figura 4.34.

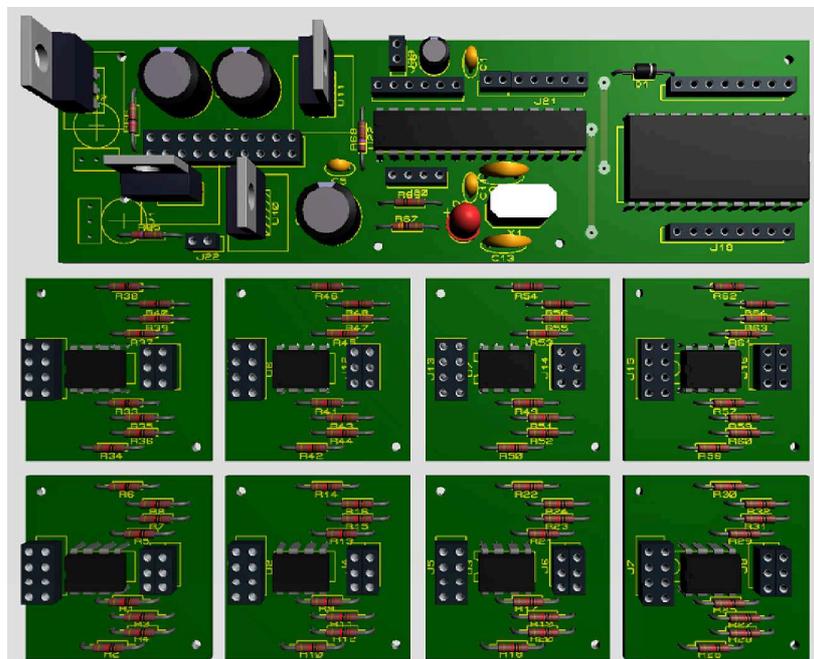


Figura 4.34: Diseño del BMS V3, versión de pruebas.

Con el diseño del BMS V3 realizado y validado en su funcionamiento, se prosigue a la manufactura del mismo, en este diseño se observa que se tienen nueve tarjetas, las pequeñas son las encargadas de sensar el voltaje de cada uno de los nodos del voltaje mientras que la tarjeta más grande es la encargada de leer todos los sensores, activar señales, así como también mandar ya sea por puerto serial o con indicadores, el estado de la batería.

En esta nueva versión, se busca que realice las mismas acciones descritas anteriormente, pero empleando una menor cantidad de componentes, lo que reducirá el tamaño y el consumo del

mismo circuito. Al realizar las pruebas sobre el prototipo en protoboard, se concluyó que este BMS cumple los requerimientos de la primera versión solo que con menos componentes, por lo que se prosiguió a fabricar la PCB del mismo, lo cual se muestra en la Figura 4.35.

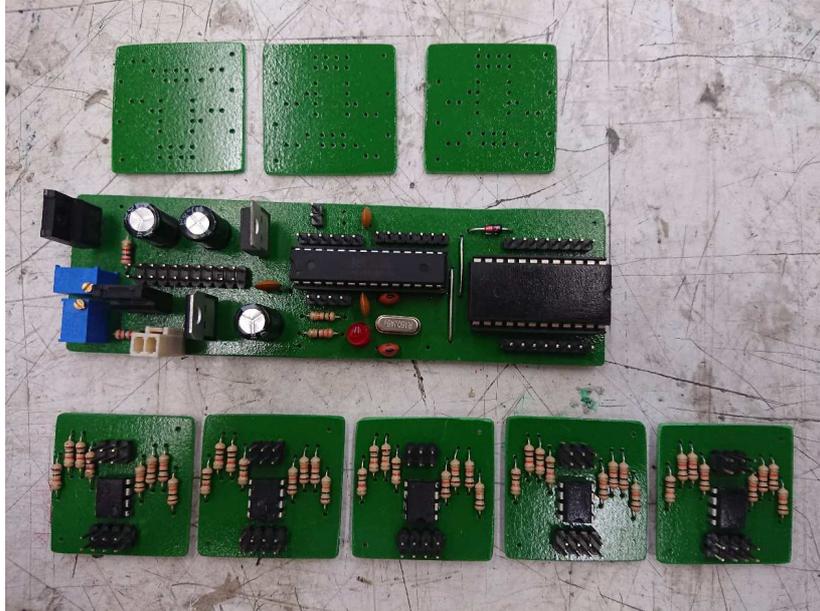


Figura 4.35: BMS V3 fabricado, versión de pruebas.

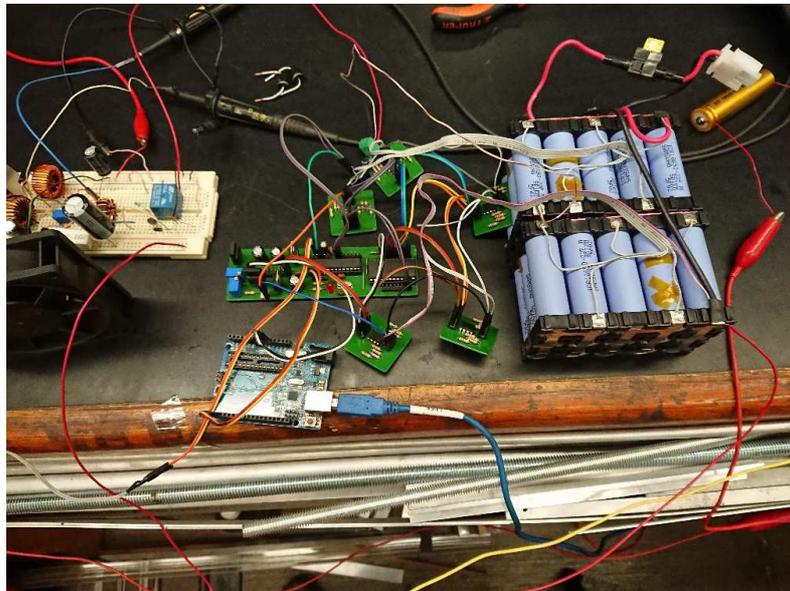


Figura 4.36: BMS V3 con otros circuitos y banco de baterías.

En la Figura 4.36 se muestra el BMS V3 conectado al banco de baterías que se está evaluando, además de otros circuitos que se están conectando ya sea por comunicación I2C, RS232, también recibiendo mediciones de corriente y mandando corte de voltaje cuando es necesario, sobre esta conexión se realizaron las pruebas de validación del BMS, la cuales fueron planteadas inicialmente como experimentos y comprobadas posteriormente.

**Los experimentos por los cuales pasó el BMS V3 son el resultado de haber fabricado varias versiones anteriormente y son resultado de la experiencia adquirida, a continuación, se describen a grandes rasgos los experimentos, así como los resultados.**

### Experimentos

#### 1. Sensado

##### a) Circuito de Voltaje.

Revisar que el circuito funcione de manera estable, que la salida de voltaje corresponda al voltaje de cada una de las baterías.

##### b) Circuito de corriente.

Revisar que el circuito de corriente lea la corriente adecuada, así como también asegurar su funcionamiento.

##### c) Circuito de Temperatura.

Caracterizar el circuito para obtener el valor de temperatura adecuado.

#### 2. Control de corriente.

Realizar pruebas de funcionalidad del circuito de corriente (comportamiento de la salida de control de la corriente) ante diferentes rangos de operación, máxima corriente, mínima corriente.

#### 3. Regulación de voltaje.

Revisar que el circuito de regulación soporte el voltaje de entrada Máximo (56 [V]), que regule el voltaje a los rangos que se emplearán en todo el sistema y verificar estabilidad ante una carga constante.

#### 4. Ruido.

##### a) Circuito de Voltaje.

Verificar que, una vez que el motor esté accionado, el ruido presente en la medición del banco de baterías sea mínimo.

##### b) Circuito de Temperatura.

Verificar el valor que arroja el circuito ante la perturbación de la bobina.

c) Cerebro o generación de señales.

Una vez accionada la bobina, el retorno de corriente afecta a todo el circuito, por eso la importancia de los filtros y el control del ruido, este ruido afecta de igual manera al cerebro del sistema, y si es demasiado puede ocasionar que el circuito deje de funcionar, afectando a las señales del control del BMS.

d) Circuito de corriente.

Debido al ruido de la bobina y como este circuito está directamente involucrado en el punto de entrada y salida de la energía, si el ruido presente es mayor al filtrado y esperado en el diseño, el control de corriente puede medir valores que no son correctos, causando que la medición no sea correcta.

5. Estabilidad.

a) Circuito de Voltaje.

Una vez accionado el motor, se revisa la estabilidad en la salida de voltaje y se compara con el estado sin el motor accionado.

b) Circuito de corriente.

Una vez accionado el motor, se revisa la estabilidad en la salida de voltaje y se compara con el estado sin el motor accionado.

c) Circuito de Temperatura.

Una vez accionado el motor, se revisa la estabilidad en la salida de voltaje y se compara con el estado sin el motor accionado.

d) Cerebro.

Se revisa que las señales de entrada y salida de la tarjeta de control funcione adecuadamente ante la perturbación de la bobina.

6. Calentamiento del circuito de regulación.

Debido a que el circuito de regulación es el que se encarga de suministrar la energía a la electrónica, este sufre calentamiento debido a la carga que transita sobre él, por lo que es importante verificar que, colocando la carga de operación, el circuito funcione sin un calentamiento excesivo (dentro de los parámetros de los componentes).

7. Estabilidad del circuito en conjunto.

Debido a que todos los circuitos tienen el objetivo de monitorear todos los parámetros de las baterías y reaccionar de acuerdo a una programación específica, es importante verificar que todos trabajen en sincronía, con y sin el motor accionado, ya que, si no trabajan en conjunto, el BMS no funcionará correctamente, esta prueba se hace durante periodos de tiempo para así asegurar que todo trabaje adecuadamente.

8. Comunicación

a) Estabilidad.

Debido a que el circuito de comunicación se encuentra siempre mandando información, es importante revisar que la trama del mismo se mantenga a lo largo del tiempo, así como también que mande la información correcta.

b) Ruido.

Revisar una vez encendido el motor, que la comunicación permanezca a lo largo del tiempo, anulando el ruido presente con los filtros que sean necesarios.

## Resultados

### 1. Sensado

a) Circuito de Voltaje.

Al conectar el circuito, se comprobó primero que un voltaje controlado fuera medido correctamente, al lograr que se midiera bien, se colocó a una batería y al comparar con el osciloscopio se observó que el circuito responde adecuadamente con un rango de error de  $\pm 0.1[V]$ .

b) Circuito de corriente.

Al conectar una carga controlada sobre el circuito, se observó que el valor que arrojaba era el correcto.

c) Circuito de Temperatura.

Para corroborar este circuito, se decidió usar un termómetro de pistola y comparar los resultados que se obtenían de la medición de este termómetro con el caracterizado, después de sacar su curva de comportamiento y corroborar su funcionamiento, se observó que el circuito arrojaba valores cercanos al de la pistola con una diferencia de  $\pm 0.3[^\circ C]$ .

### 2. Control de corriente.

Al conectar el circuito a una carga controlada se observó que el voltaje que arrojaba era correspondiente a la corriente (datos obtenidos de la hoja de especificaciones del sensor), además al conectar el motor se observó que el circuito mantenía su voltaje de forma estable.

### 3. Regulación de voltaje.

El circuito soporta un voltaje de entrada de 56 [V] (correspondiente al voltaje total del banco de baterías) y regula de manera adecuada cada uno de los voltajes de operación del BMS.

### 4. Ruido.

a) Circuito de Voltaje.

Al encender el motor el ruido presente en el sensado del voltaje se observa que el valor permanece estable con un error ligeramente superior de  $\pm 0.15[V]$ .

b) Circuito de Temperatura.

Con el motor encendido se observa que la señal de temperatura permanece en el mismo valor de  $\pm 0.3[^\circ C]$ .

c) Cerebro o generación de señales.

Al observar las señales alrededor de la tarjeta con el motor encendido, se observa que las señales no se ven afectadas por este ruido.

d) Circuito de corriente.

Al encender el motor y revisar las señales que corresponden al valor de corriente, se observa que no hay variación debido al ruido ya que el sensor se encuentra aislado de manera magnética.

5. Estabilidad.

a) Circuito de Voltaje.

El voltaje se mantiene dentro del error medido a lo largo del tiempo, sin variación más que por el cambio de voltaje en la misma batería.

b) Circuito de corriente.

El circuito de corriente manda el valor de corriente adecuado comparado con el de un multímetro a lo largo del tiempo.

c) Circuito de Temperatura.

El voltaje de la caracterización previa en el circuito de temperatura se observa que se mantiene estable a lo largo del tiempo con el motor funcionando.

d) Cerebro.

El circuito de control permanece en operación a lo largo del tiempo en presencia del motor, leyendo la información y mandando la información por el puerto de comunicación sin problemas.

6. Calentamiento del circuito de regulación.

El circuito al bajar el voltaje a los voltajes empleados en el circuito se observa que necesita un disipador para mantenerse estable, fuera de eso, el circuito funciona sin problema durante su periodo de operación.

7. Estabilidad del circuito en conjunto.

Al conectar todos los circuitos entre sí, con el motor encendido se observa que el circuito en conjunto (es decir el BMS) funciona de manera estable a lo largo de su periodo de tiempo de trabajo.

## 8. Comunicación

## a) Estabilidad.

Al estar en presencia del ruido del motor, se observa que los filtros colocados son lo suficientemente robustos para evitar que la comunicación se pierda a lo largo del tiempo, por lo que es estable.

## b) Ruido.

El ruido en la comunicación es mínima y no altera los datos recibidos, así como también se observa que el ruido no está afectando al cerebro del BMS.

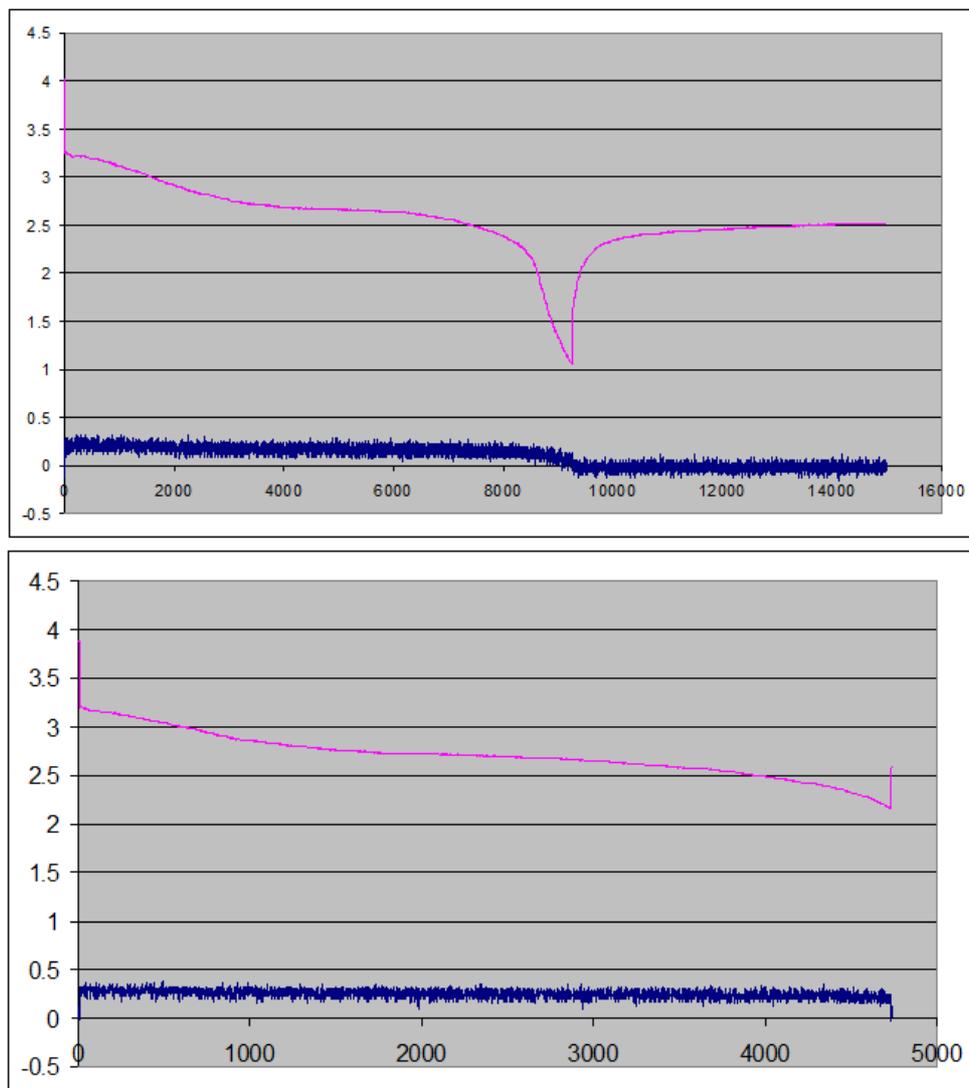


Figura 4.37: Gráfica descarga de una batería.

**Con estos resultados se concluye que la versión tres de este BMS funciona adecuadamente y sirve de base para el diseño final.**

Adicionalmente a todas estas pruebas en el BMS, también se realizaron pruebas a las baterías, empleando el BMS mostrado en la Figura 4.36, estas pruebas fueron realizando carga y descarga de una batería, con el fin de asegurar que los parámetros del fabricante fueran correctos, en la Figura 4.37 se muestra uno de estos ciclos de descarga de una batería (la prueba mostrada es a corriente constante), en la cual la línea azul es la corriente y la línea rosa es el voltaje.

### 4.3. Diseño general del Cargador

A diferencia del controlador y el BMS, de los cuales se tienen varios diseños desarrollados y llevados a cabo con anterioridad, el cargador es el circuito más reciente a diseñar en comparación.

Un cargador se puede definir como una fuente controlada, si partimos de esta idea, anteriormente se han diseñado y construido diversas fuentes, tanto conmutadas como lineales (fijas o variables), cada una tiene sus puntos a favor y sus puntos en contra.

#### 4.3.1. Fuente lineal.

Este tipo de fuentes tienen la característica de ser simples, tanto en su diseño como en su fabricación, esto debido a que cuentan principalmente con cuatro componentes o etapas esenciales:

1. Transformación.
2. Rectificación.
3. Filtrado.
4. Regulación.

La etapa de transformación se encarga de modificar el voltaje de entrada a un voltaje mayor o menor en su salida dependiendo de la aplicación; los transformadores son elementos que únicamente pueden trabajar con voltaje alterno y es uno de los elementos principales dentro de una fuente de alimentación lineal.

La etapa de rectificado está construida principalmente por un puente de diodos, el cual recibe el voltaje de salida del transformador (recibe voltaje en alterna) y se encarga de convertir el voltaje de corriente alterna en un voltaje de corriente directa.

La etapa de filtrado se encarga de disminuir la variación de voltaje recibido del puente de diodos (a la salida del puente de diodos) a través de capacitores, es decir se atenúa el rizo del voltaje de salida.

La etapa de regulación se encarga de recibir la señal proveniente del filtro de capacitores para que en la salida se obtenga un voltaje continuo a la salida (generalmente el voltaje de entrada es mayor para reducirlo a uno diferente).

A pesar de que las fuentes de voltaje lineales son simples, su principal desventaja es su tamaño y que al disminuir el voltaje los elementos tienden a calentarse debido a que disipan la energía al bajar el voltaje.

### 4.3.2. Fuente Conmutada.

Estas fuentes están basadas en la conmutación de un transistor o un elemento que permita conmutar a alta frecuencia, este tipo de fuentes se desarrollaron para solucionar los problemas de disipación térmica que tienen las lineales, así como también para obtener una potencia similar a una fuente lineal, pero en un tamaño considerablemente más reducido.

Aunque se soluciona el problema de la disipación y el tamaño de las fuentes lineales, estas fuentes son más complejas y su composición varía mucho, pero este tipo de fuentes se pueden dividir en los siguientes bloques:

1. Rectificación.
2. Filtrado.
3. Conmutación.
4. Rectificación secundaria.
5. Filtrado secundario.
6. Controlador.

La etapa de rectificado está construida principalmente por un puente de diodos, el cual recibe el voltaje en corriente alterna (a su entrada), y se encarga de convertir el voltaje de corriente alterna en un voltaje de corriente directa (a su salida).

La etapa de filtrado se encarga de disminuir la variación de voltaje recibido del puente de diodos (a la salida del puente de diodos), a través de capacitores es decir se atenúa el rizo del voltaje de salida.

La etapa de conmutación se encarga de convertir el voltaje de corriente directa en una señal pulsante de onda cuadrada, la cual es introducida a un transformador para así tener una “corriente alterna” y que el transformador pueda funcionar.

La etapa de rectificación secundaria se coloca a la salida del transformador (el transformador conmutado a alta frecuencia) y se vuelve a colocar un puente de diodos para rectificar nuevamente el voltaje en alterna generado por los pulsos y pasarlo a un voltaje en directa.

La etapa de filtrado secundario al igual que el filtrado primario se coloca a la salida del bloque anterior (rectificado secundario), para poder entregar una señal continua más lineal.

La etapa del controlador, se encargará de controlar la oscilación de la etapa de conmutación, esta etapa se compone de un circuito oscilador que trabaja a una frecuencia fija, compara el voltaje de salida y ajusta el ancho de pulso de la entrada (PWM), para así compensar obtener la salida el voltaje deseado.

### 4.3.3. Diseño

Siguiendo lo anterior expuesto, se puede decir que un cargador es una fuente, partiendo de esto y por las características de las fuentes tanto lineales como conmutadas, se decide diseñar una fuente conmutada, principalmente por el espacio ya que aunque son más complejas de diseñar y fabricar, en nuestro caso nos interesa que pueda entrar en diferentes tipos de vehículos, con diferentes tamaños y espacios, en el caso de los vehículos grandes no existe problema en colocar elementos grandes, pero en el caso de utilizar el diseño de este cargador en vehículos más pequeños en los cuales no se dispone de mucho espacio, es cuando las fuentes conmutadas resaltan por el tamaño que pueden llegar a tener.

Para empezar el diseño partimos del esquema general de una fuente conmutada el cual es mostrado en la Figura 4.38, en la cual se muestran las seis etapas, rectificación, filtrado, conmutación, rectificación secundaria, filtrado secundario, controlador.

Con esta idea se empieza a dividir la fuente en elementos principales, como se observa la fuente conmutada está dividida en dos secciones de rectificado y filtrado, por tamaño y facilidad en esta primera versión se tomará la primera parte como una entrada de voltaje regulada por el primer filtrado, el voltaje elegido para esto es de 56 [V] esto debido a que el voltaje necesario para cargar un banco de baterías de 48 [V] nominales, es necesario tener la carga completa de la batería es de 54.6 [V], por lo que el tener un voltaje ligeramente superior asegura que las baterías se cargarán completamente.

Adicional al voltaje también es necesario definir la corriente a la cual funcionará el cargador, para esto se toman los datos del fabricante el cual dice que el valor máximo para una carga

rápida es de 3100 [mA], aunque el recomendado es de 1650 [mA], por lo que al tener un banco de baterías en paralelo la corriente se divide entre los elementos.

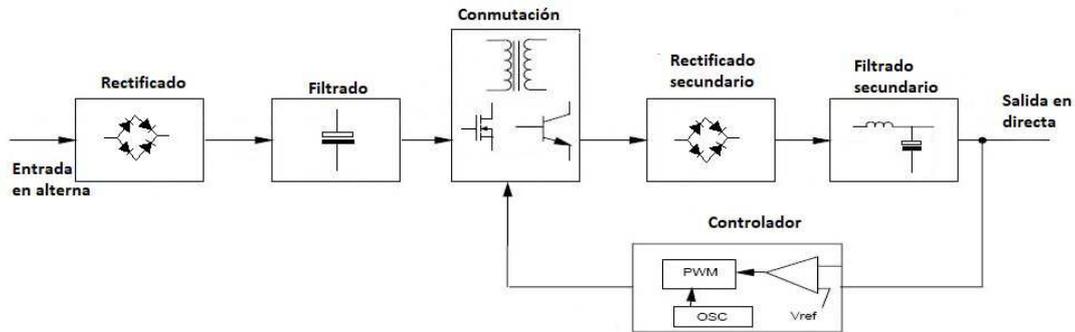


Figura 4.38: Esquema general de una fuente conmutada.

Por las características de las baterías, y lo recomendado por el fabricante, en caso de tener un banco de baterías con  $x$  número de baterías en paralelo, la corriente de carga se divide entre el número de elementos, es decir que la carga recomendada para la batería será como se muestra en la ecuación siguiente:

$$C_{Carga} = \#Baterías * (miliamperios\_recomendados) \quad (4.1)$$

En el caso de tener un banco con dos baterías en paralelo, la carga de la batería sería como se muestra en la ecuación  $C_{Carga} = (2) * (1650[mA]) = 3300[mA]$ , así que dependiendo el tamaño del banco de baterías la carga recomendada va a variar, pero empleando la ecuación 4.1, se puede obtener la corriente que necesita cada banco de baterías.

Para el primer diseño las características a la cual se diseña el cargado es de 56 [V] y una corriente de operación de 2 [A], siguiendo el esquema de funcionamiento de una fuente conmutada, y partiendo de una entrada de voltaje constante, la estructura queda como se enumera a continuación.

1. Conmutación.

Realiza la conmutación de la bobina para generar el voltaje de operación.

2. Rectificación secundaria.

Vuelve el voltaje generado por la conmutación en un voltaje de corriente directa.

3. Filtrado secundario.

Reduce el rizado debido a la conmutación.

#### 4. Controlador.

Controla la conmutación de la bobina empleando el PWM, así como también regula la cantidad de corriente que circula por el cargador.

Con el esquema general, se procede al diseño del circuito, implementando la idea del diseño inicialmente en protoboard tal como se muestra en la Figura 4.39, sobre este circuito se realizarán los primeros experimentos.

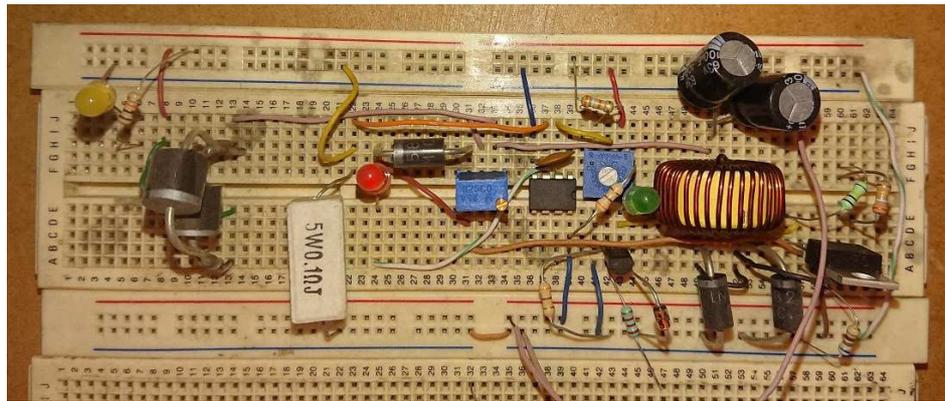


Figura 4.39: Fuente conmutada V1 en protoboard.

Previamente a la construcción del circuito en una tarjeta fenólica, el circuito debe superar algunas pruebas de funcionamiento, dichas pruebas al igual que con los circuitos anteriores, se plantean los experimentos a realizar, dichos experimentos se enumeran a continuación:

### Experimentos

#### 1. Conmutación

Revisar que el circuito genere un PWM a una frecuencia fija para activar la bobina.

#### 2. Rectificado

Revisar que el voltaje a la salida de la bobina se vuelva un voltaje en corriente directa.

#### 3. Filtrado

Revisar que el voltaje a la salida de los capacitores, colocados a la salida del rectificado, reduzcan el rizo del voltaje.

#### 4. Control

- a) Revisar que el circuito al conectar una carga constante menor a dos amperes mantenga el voltaje en 56 [V].

- b) Revisar que el circuito al conectar una carga superior a dos amperes mantenga el control de la corriente limitada a dos amperes.

#### 5. Calentamiento

Revisar el calentamiento que sufre el circuito al estar con una carga constante de dos amperes durante un periodo de tiempo, verificando que el circuito no falle en el tiempo debido a la temperatura de operación del componente.

#### 6. Estabilidad

Revisar que el circuito con una carga constante se mantenga estable a lo largo del tiempo permitiendo alcanzar el voltaje de carga máxima de las baterías, esta prueba se hace conectando el banco de baterías.

### Resultados

#### 1. Conmutación

Al conectar el circuito con un voltaje de entrada y una pequeña carga a la salida, se observa que existe una conmutación a una frecuencia fija y el PWM está presente en el circuito.

#### 2. Rectificado

El voltaje a la salida de la etapa de rectificación es de corriente directa.

#### 3. Filtrado

El rizado existente a la salida de la etapa de rectificado se ve reducido por los capacitores colocados.

#### 4. Control

- a) Al conectar una carga menor a dos amperes, se observa que el circuito mantiene el voltaje de 56 [V].
- b) Al conectar una carga mayor a dos amperes, se observa que el control limita la corriente de operación a dos amperes, modificando el PWM y manteniendo constante en su punto límite.

#### 5. Calentamiento

Al conectar el circuito a una carga de dos amperes (carga máxima de esta versión), se observa que el circuito se calienta por lo que se le coloca un disipador de calor, con este disipador el circuito se mantiene dentro de una temperatura adecuada de operación, ya que no se incrementa más allá del punto de falla del componente (la temperatura se mantiene constante durante la operación).

## 6. Estabilidad

Al fabricar el banco de baterías (Figura 4.40) y realizar ciclos de carga y descarga del banco de baterías se observa que el cargador funciona de manera estable a lo largo de los ciclos, ya que el circuito se comporta de manera repetitiva.

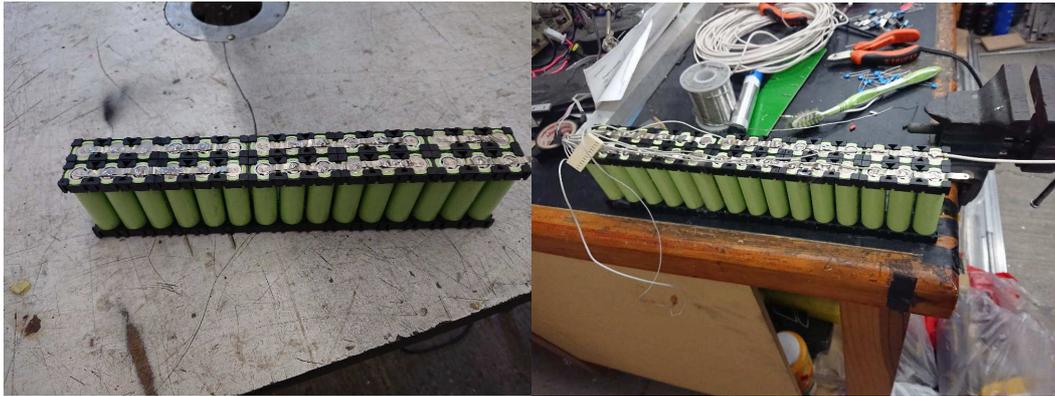


Figura 4.40: Banco de baterías Case V1.

Con los experimentos realizados y validados, se prosigue a realizar el diseño de la PCB del cargador V1 mostrado en la Figura 4.41, esto con el objetivo de verificar el funcionamiento del circuito en condiciones reales, es decir en un cases cerrado, colocado sobre alguno de los vehículos, así como también observar si el circuito trabaja de manera adecuada con en BMS y el controlador.

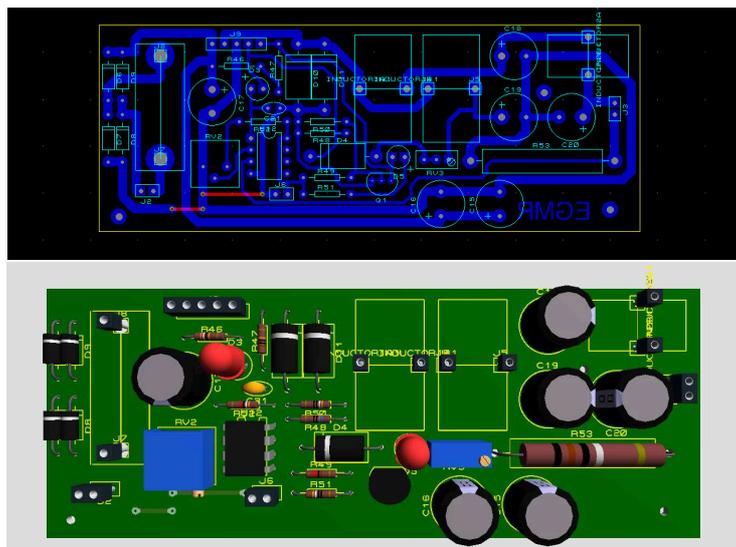


Figura 4.41: Diseño del cargador V1.

Con el diseño realizado se prosigue a la fabricación del circuito en una tarjeta fenólica, el cual se muestra en la Figura 4.42.

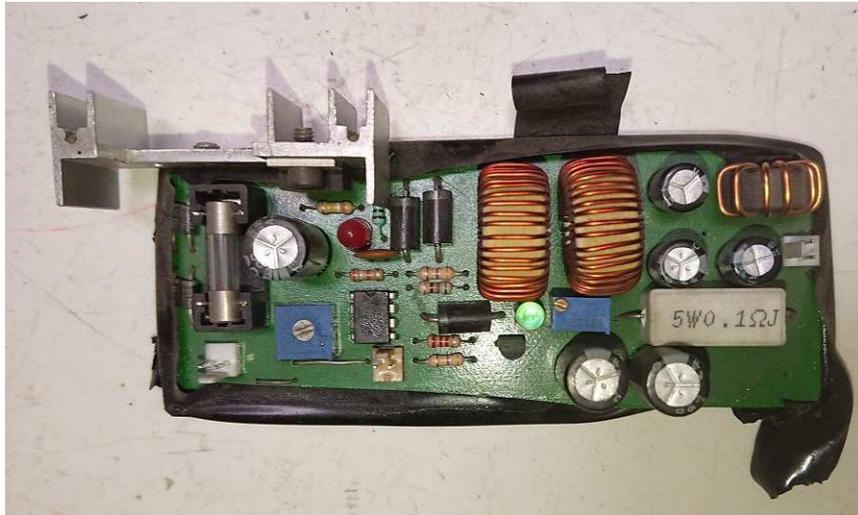


Figura 4.42: Cargador V1 fabricado en PCB.

Ya con la tarjeta fabricada (cargador V1), al igual que en la versión realizada en protoboard, se requiere la validación de la misma, para así asegurar su funcionamiento, cuyos resultados son descritos a continuación:

#### Resultados sobre la tarjeta fabricada [Cargador V1]

##### 1. Conmutación

Al conectar el circuito con un voltaje de entrada (voltaje en corriente directa de 56 [V]) y una pequeña carga a la salida, se observa que existe conmutación a una frecuencia fija y el PWM está presente en el circuito.

##### 2. Rectificado

El voltaje a la salida de la etapa de rectificación es de corriente directa.

##### 3. Filtrado

El rizado existente a la salida de la etapa de rectificado se ve reducido por los capacitores colocados.

##### 4. Control

- a) Al conectar una carga menor a dos amperes, se observa que el circuito mantiene el voltaje de 56 [V].

- b) Al conectar una carga mayor a dos amperes, se observa que el control limita la corriente de operación a dos amperes, modificando el PWM y manteniendo constante en un punto límite.

#### 5. Calentamiento

Con el disipador colocado, el circuito se mantiene a una temperatura constante sin superar el punto de fallo del componente.

#### 6. Estabilidad

El circuito probado, cargando el banco de baterías se comporta de manera repetitiva y estable en el voltaje y el control de la corriente.

Con el diseño comprobado se procede a realizar pruebas de funcionamiento sobre un vehículo, en este caso se empezó a realizar en una bicicleta, el cual también es uno de los vehículos más empelados en la movilidad, se decidió el colocar este circuito sobre este vehículo debido al tamaño reducido del que se dispone, ya que no es tan pequeño como en un vehículo última milla pero es más pequeño que los vehículos prototipo y urbano fabricados anteriormente, la bicicleta sobre la que se empezó a colocar esta electrónica es una bicicleta diseñada en Diseño Industrial y fabricada en el Instituto de Ingeniería, la cual para nuestra caso únicamente tuvo la función de dimensionar el tamaño del que se dispone para la electrónica.

También sobre esta misma bicicleta se colocó el banco de baterías que empleará esta bicicleta, en la Figura 4.43 se muestra el banco de baterías colocado en la bicicleta.



Figura 4.43: Banco de baterías en bicicleta.

Esta bicicleta es parte de otro proyecto que se realiza en paralelo al trabajo de tesis mostrado, la cual tiene un sistema de monitoreo cuya primera versión se muestra en la Figura 4.44 (este diseño no fue realizado por el autor de este trabajo), este diseño posteriormente fue rediseñado

para reducir su tamaño y poder introducir la tarjeta dentro de la bicicleta (el nuevo diseño fue realizado por el autor de este trabajo, ya que con la experiencia que se tiene, tanto en diseño electrónico como en manufactura, era necesario tener un sistema confiable para estas pruebas), esta tarjeta rediseñada se muestra en la Figura 4.45.

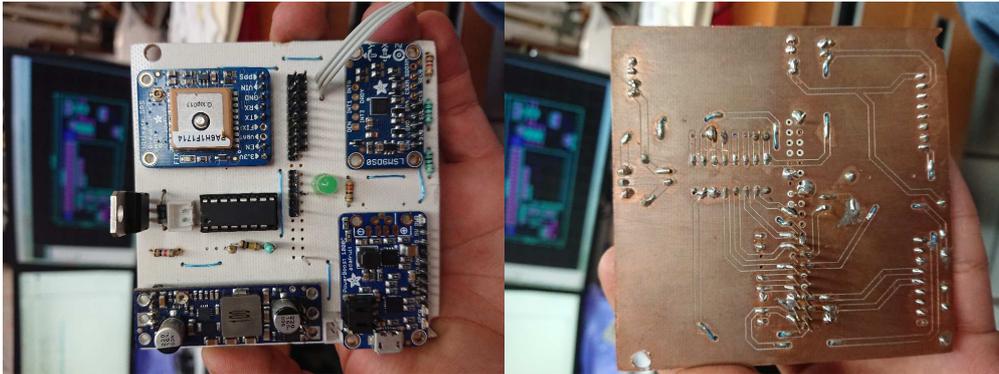


Figura 4.44: Tarjeta de monitoreo V1.

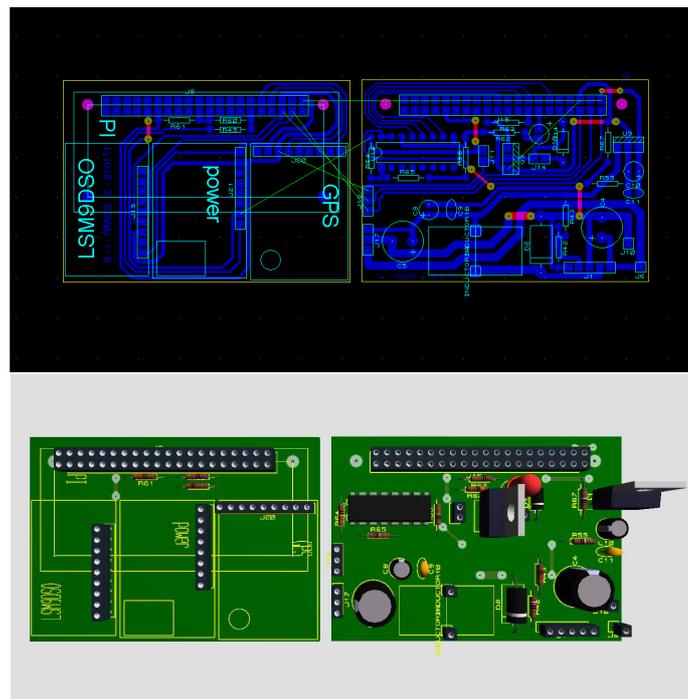


Figura 4.45: Re-diseño de sistema de monitoreo V2.

Mientras que en la Figura 4.46 se muestran las tarjetas fabricadas del sistema de monitoreo

V2, estas tarjetas únicamente se emplean en este proyecto y no son empleadas en ningún otro vehículo. A partir de aquí inician los diseños electrónicos finales de cada uno de los vehículos, partiendo de lo realizado y expuesto en este capítulo.

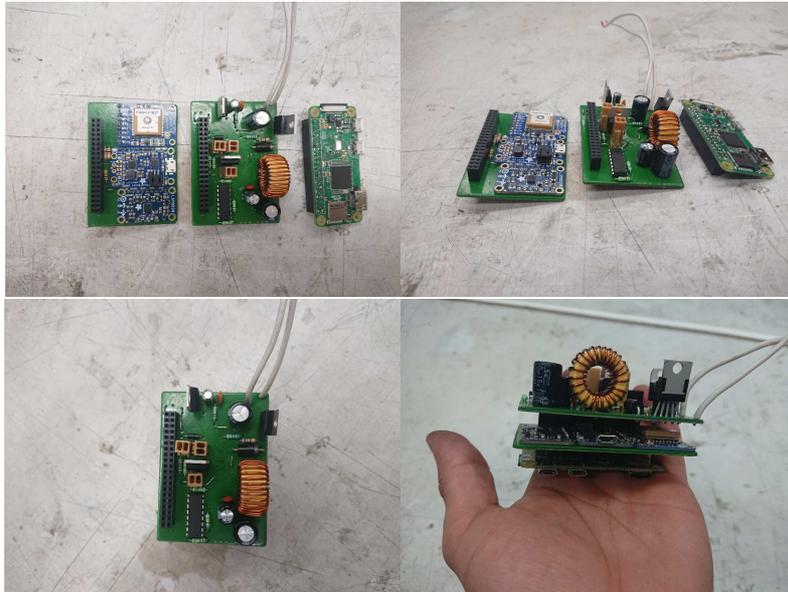


Figura 4.46: Sistema de monitoreo V2 fabricado.

## Capítulo 5

# Resultados

En este capítulo se muestran los resultados de cada uno de los circuitos diseñados y construidos, objetivo de este trabajo, **los cuales son resultado de la experiencia adquirida tanto a lo largo de este trabajo de tesis, así como también del trabajo que se ha realizado anteriormente**, también se muestran las conclusiones a las cuales se han llegado en cada uno de los sistemas diseñados y fabricados.

De los prototipos fabricados hasta este punto **se llega a una conclusión importante, la cual es que se puede emplear el mismo diseño base de controlador, BMS y cargador para ambos vehículos**, claro que teniendo en cuenta algunos parámetros importantes como lo son la corriente y la capacidad que tiene cada uno de los bancos de baterías los cuales serán diferentes por las características de cada vehículo.

Por lo anterior en este capítulo adicionalmente a lo descrito, solo se hablará de los diseños fabricados, los cuales incluyen un BMS, un cargador (los cuales serán empleados en los dos vehículos y programados con cada uno de los parámetros necesarios) y dos controladores uno para el vehículo prototipo y otro para el vehículo urbano, estos controladores estarán basados igualmente en un único diseño.

### 5.1. Diseño del controlador

Se inicia el diseño del controlador partiendo de la experiencia adquirida de los desarrollos anteriores, principalmente de la V7, así como también se toma en cuenta la manufactura de los mismos ya que el diseño va ligado con la construcción e implementación de la electrónica, aunque

no se muestran las imágenes explícitamente de las pruebas de cada uno de los circuitos, así como la validación de estos mismos, los experimentos fueron realizados en protoboard, ya que aunque se conozca como se va a comportar el circuito completo, siempre es bueno el tener la certeza de su funcionamiento y así poder realizar cambios en el diseño previo a la fabricación en una placa fenólica.

### 5.1.1. Vehículo prototipo

Como hemos venido manejando, iniciamos con un esquema general de la arquitectura de la cual estará constituido el controlador, dicho esquema general se muestran en la Figura 5.1, donde observamos las partes principales de las cuales está constituido el diseño final que se desarrolló.

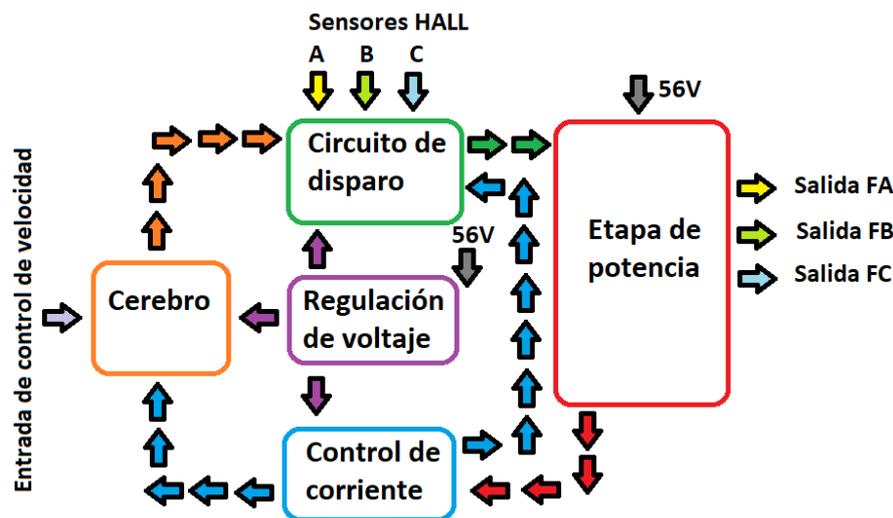


Figura 5.1: Esquema final del controlador.

Del esquema se observa que el controlador estará constituido de cinco tarjetas principales, cada una con una función en específico y de gran importancia para el correcto funcionamiento del circuito, se decidió realizar esta división de esta forma debido al comportamiento observado de la electrónica a lo largo de las versiones realizadas, además de esta forma se logra escalar el circuito de una manera más sencilla.

De lo que se ha visto con anterioridad en otros capítulos y siguiendo la misma línea del desarrollo, para que estas tarjetas funcionen adecuadamente deben cumplir algunos requisitos mínimos los cuales fueron expresados anteriormente como experimentos, pero por la experiencia adquirida se decide arreglar esos experimentos en cinco, uno para cada tarjeta, agregando algunos que se evaluarán en esta sección, la descripción de cada uno se muestra a continuación:

### 1. Potencia.

Este circuito es el encargado de proveer la energía al motor, es el que permite conmutar cada una de las bobinas y da el voltaje que controla la velocidad, así como también es el circuito que está en contacto directo con el motor y es el que recibe todas las señales de control.

#### Experimentos 1 (Circuito de potencia)

a) Ruido del circuito.

Cuando el motor esté funcionando (girando en un sentido), revisar que el ruido generado por la bobina no afecte a la etapa de potencia, que lo único que ocurra en el circuito sea la conmutación de la bobina.

b) Estabilidad.

Debido a que todos los circuitos tienen el objetivo de accionar el motor, y que todos trabajan en conjunto para este fin, es importante verificar que una vez accionada la electrónica de potencia, que es el circuito que se conecta directamente con las bobinas, se comporte de manera estable, es decir que reciba las señales correspondientes de cada circuito y que las ejecute de la manera correcta durante su periodo de funcionamiento.

Se prueba que el circuito de potencia responda ante la conmutación y un funcionamiento constante del motor, permitiendo que funcione dentro de unos parámetros de ruido (el ruido resultante de las bobinas al estar encendidas), el cual no es posible quitar en su totalidad.

c) Calentamiento.

Sobre este circuito pasa toda la corriente del motor, por lo tanto, es el circuito que tiene la mayor carga de todo el controlador, por lo que es inevitable que la etapa de potencia se caliente, lo que se verifica es que los componentes trabajen dentro de sus rangos de operación (rangos obtenidos de su hoja de especificaciones).

d) Prueba de funcionamiento.

Con los circuitos integrados (todos interconectados), se prueba que se obtengan las señales de salida esperadas en cada situación de operación.

e) Prueba de duración.

Con el motor girando en un sentido, se deben realizar diferentes pruebas de duración, las cuales son mantener el motor encendido a diferentes cargas y diferentes velocidades, esto con el fin de asegurar que la electrónica no fallará en los periodos de utilización pensados (de al menos 60 minutos, lo necesario para la competencia de Shell Eco Marathon).

Con las pruebas planteadas y descritas, así como también de la experiencia adquirida hasta este punto, se procede al diseño de la tarjeta teniendo en cuenta las necesidades mínimas

que debe cumplir este diseño.

En la Figura 5.2 se muestra el diseño de la tarjeta de potencia, en el cual se toman en cuenta los requerimientos mínimos para que funcione, así como también se toma en cuenta el proceso de ensamble (manufactura), la colocación de filtros, y disipadores, ya que, al ser el circuito con mayor carga de corriente y voltaje, este debe tener sus disipadores colocados en los componentes para asegurar que no falle por un exceso de temperatura.



Figura 5.2: Diseño de la etapa de potencia para el vehículo prototipo VF.

Otro factor que se toma en cuenta en este diseño es el ancho de las pistas, por la cual circula la corriente que se le proporciona al motor, ya que, aunque no se ha comentado, es un punto en el cual puede llegar a fallar la etapa de potencia debido a una sobre corriente en una pista muy pequeña.

Este sería el diseño principal de la tarjeta de potencia para el vehículo prototipo, el cual será empleado durante las pruebas del mismo.

## 2. Fuente de alimentación.

Este circuito es el encargado de proveer el voltaje necesario a cada una de las tarjetas, su función es permitir que los circuitos se comporten de manera estable filtrando el ruido existente debido al motor.

### Experimentos 2 (Circuito de alimentación)

#### a) Regulación de voltaje.

Revisar que el circuito de regulación soporte el voltaje de entrada Máximo (56 [V] proveniente del banco de baterías cargado), que regule el voltaje a los rangos que se emplearán en todo el controlador (en cada tarjeta) y verificar estabilidad ante una carga constante.

#### b) Ruido.

Revisar que el circuito amortigüe el ruido debido a la bobina, así como también que mantenga el voltaje de operación de cada una de las tarjetas (amortiguando el ruido de la bobina).

c) Estabilidad.

Revisar que el circuito mantenga los voltajes de operación a lo largo del tiempo, además de que no se vean afectados por el ruido proveniente de la bobina.

d) Calentamiento.

Debido a que el circuito de regulación es el que se encarga de suministrar la energía a la electrónica, este sufre calentamiento debido a la carga que transita sobre él, por lo que es importante verificar que, con la carga de operación, el circuito funcione sin un calentamiento excesivo (dentro de los parámetros de los componentes).

Al igual que la tarjeta de potencia, el diseño de la tarjeta de alimentación debe ser realizada pensando en cumplir al menos estos experimentos para considerarse una tarjeta funcional, así como también se debe considerar la manufactura de la tarjeta y los elementos adicionales que esta necesitará, en la Figura 5.3, se muestra el diseño de esta tarjeta.

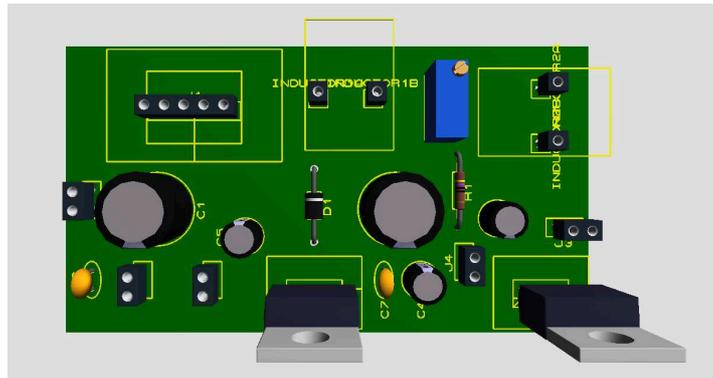


Figura 5.3: Diseño de la fuente de alimentación para el vehículo prototipo VF.

El diseño de esta tarjeta de alimentación, es la que será empleada en esta versión final del controlador.

### 3. Control de corriente.

Este circuito es el encargado de regular la corriente que circula por el motor, esta corriente tiene un valor máximo el cual se especifica de manera permanente en el circuito (esta corriente se fijará durante las pruebas), su función principal es proteger a la electrónica, así como al motor por un exceso de corriente.

#### Experimentos 3 (Circuito de control de corriente)

a) Control de corriente.

Realizar pruebas de funcionalidad del circuito de corriente (el comportamiento de la salida del control de la corriente) ante diferentes rangos de operación, máxima corriente, mínima corriente y respuesta ante la entrada de control de velocidad.

## b) Ruido.

Debido al ruido de la bobina y como este circuito está directamente involucrado en el control del motor, si el ruido presente es mayor al filtrado y esperado en el diseño, el control de corriente puede medir valores que no son correctos, causando que la potencia se caliente y llegue a fallar.

## c) Estabilidad.

Al ser uno de los circuitos principales es importante verificar el correcto funcionamiento de este circuito, por lo que la presencia de ruido es un factor que se debe revisar en la estabilidad del mismo, ya que sus rangos de operación deben mantenerse a la salida de control del circuito, ya que, si falla el controlador puede llegar a quemarse por una mala medición y la liberación inadecuada de la corriente sobre la etapa de potencia.

El diseño de la tarjeta de control de corriente debe ser realizada pensando en cumplir al menos estos experimentos para considerarse una tarjeta funcional, y al igual que en los casos anteriores tomar en cuenta el proceso de manufactura de la tarjeta, en la Figura 5.4, se muestra este diseño.

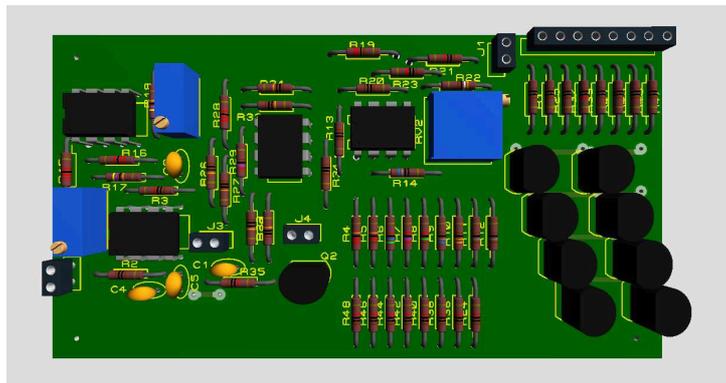


Figura 5.4: Diseño del control de corriente para el vehículo prototipo VF.

Este circuito de control es el que será implementado en el controlador final del vehículo prototipo, y es muy similar al del vehículo urbano, cambiando algunos parámetros, sobre todo el rango de operación en corriente máxima permitida.

#### 4. Circuito de disparo.

Este circuito es el que provee la conmutación a la etapa de potencia, es el encargado de permitir que la etapa de potencia actúe de manera correcta, suministrando las señales necesarias para el correcto funcionamiento del motor, este circuito recibe las señales de control de corriente, y de velocidad, provenientes de la tarjeta de control de corriente y cerebro respectivamente.

**Experimentos 4 (Circuito de disparo)**

## a) Adquisición de sensores.

Revisar la adquisición de los sensores de efecto hall por parte de la electrónica.

## b) Secuencia de conmutación.

Una vez recibida la señal del sensor de efecto hall, verificar que el circuito de conmutación mande la salida correspondiente a la secuencia, para activar el giro del motor en una dirección.

## c) Conmutación.

Verificar que, el circuito de conmutación mande el voltaje y la secuencia adecuada a la etapa de potencia.

## d) Ruido en el circuito de conmutación.

Verificar que, una vez que el motor esté accionado, el ruido presente en la conmutación sea mínimo, permitiendo activar y desactivar la bobina.

## e) Estabilidad del circuito de conmutación.

Una vez accionado el motor, se revisa la estabilidad en la conmutación, ya que está involucrado tanto la secuencia de acción en cada bobina, como el control de la corriente.

El diseño de la tarjeta de disparo debe ser realizada pensando en cumplir al menos estos experimentos para considerarse una tarjeta funcional, ya que es la encargada de recibir todas las señales de las demás tarjetas y servir de puente de conexión a la etapa de potencia, su adecuado funcionamiento es de gran importancia ya que, si llega a fallar en la lectura de algún parámetro, el controlador se puede comportar de una manera indeseada.

En la Figura 5.5 se muestra el diseño de esta tarjeta, la cual será empleada para para los motores tanto del urbano como del prototipo, claro que siempre teniendo en cuenta que se puede mejorar, ya sea en los elementos que la constituyen como el arreglo, pero la esencia del funcionamiento será igual.

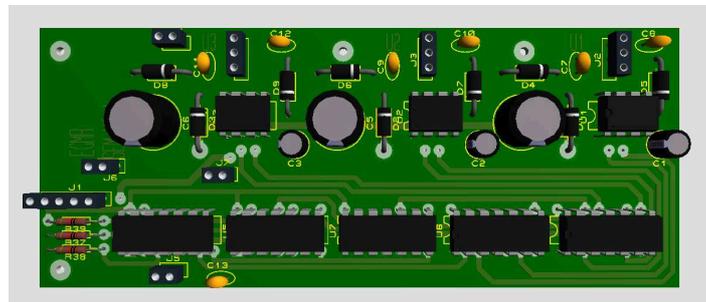


Figura 5.5: Diseño del circuito de disparo para el vehículo prototipo VF.

## 5. Cerebro.

Este circuito es el encargado de proveer información, ya sea al usuario o a la electrónica, esta tarjeta permite modificar parámetros de manera sencilla cambiando los valores dentro del programa, puede permitir el control del motor, mejorando la eficiencia del mismo, restringir velocidades máximas, así como también permite la configuración del acelerador ya sea en una rampa o en múltiples rampas dependiendo de la necesidad.

### Experimentos 5 (Circuito Cerebro)

#### a) Ruido.

Una vez accionada la bobina, el retorno de corriente afecta a todo el circuito, por eso la importancia de los filtros y el control del ruido, este ruido afecta de igual manera al cerebro del controlador, y si es demasiado puede ocasionar que el circuito deje de funcionar, afectando todo el control del motor, por lo que es importante asegurar que la tarjeta funcione con el ruido presente.

#### b) Estabilidad.

Debido a que este circuito es el encargado de fijar parámetros del controlador y mantenerlos a lo largo de la operación, es necesario revisar que el circuito se mantenga estable a lo largo del tiempo, que no se alteren los valores y que reaccione de acuerdo a lo programado, si los valores se ven modificados por algún error en la programación o por algún problema en el circuito, es necesario corregirlo ya que si no se corrigen el circuito causará un efecto negativo en el comportamiento completo del controlador.

El diseño de la tarjeta cerebro debe ser realizada pensando en cumplir al menos estos experimentos para considerarse una tarjeta funcional, en la Figura 5.6 se muestra dicha tarjeta, la cual será implementada en el controlador final.

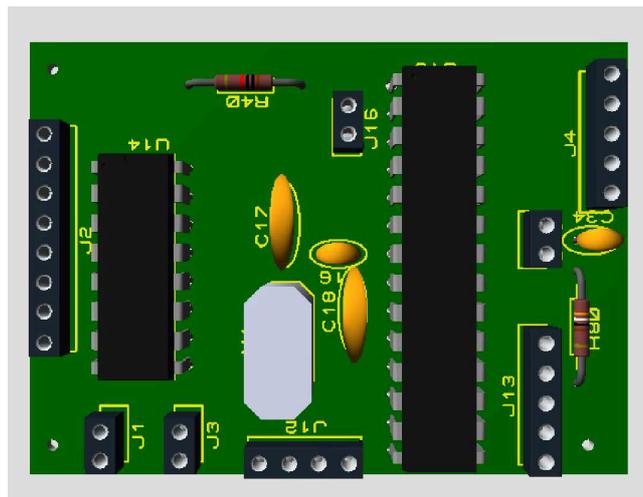


Figura 5.6: Diseño de la tarjeta cerebro para el vehículo prototipo VF.

Adicional a todos estos experimentos, es necesario el realizar pruebas en conjunto de todo el sistema, con todas las tarjetas interconectadas, esto para asegurar que el controlador conformado por cinco tarjetas funciona bien.

Todos estos experimentos tienen el propósito de verificar el correcto funcionamiento del controlador al conectarlo, así como también el facilitar encontrar errores al implementar la electrónica.

Hasta este punto se tiene el diseño del controlador final para el vehículo prototipo, la manufactura de este se tratará más adelante.

### 5.1.2. Vehículo urbano

Al igual que el controlador del vehículo prototipo, el controlador del vehículo urbano debe cumplir algunas características mínimas para lograr que funcione, estas pruebas fueron descritas en el diseño del controlador del vehículo prototipo y son las mismas para el vehículo Urbano, esto es debido a que los dos controladores son basados en un mismo diseño, el cual es la versión siete mostrada en el capítulo anterior.

La principal diferencia entre cada controlador, es el rango de operación de corriente, ya que el vehículo urbano posee dos motores en lugar de uno, pero para facilitar la implementación de este controlador se emplearán dos tarjetas separadas que conformarán al controlador completo (ya que se trabaja con dos motores, se emplean dos controladores en paralelo),

Para hacer una comparativa entre las principales diferencias existentes en los dos controladores, se describe a grandes rasgos como está conformado el controlador en su interior, tomando como base las cinco tarjetas del vehículo prototipo.

La tarjeta de conmutación en esencia es la misma pero duplicada debido a que son dos motores, la tarjeta de regulación es exactamente la misma, el circuito cerebro cambia debido a que debe controlar más cosas (dos motores) y la tarjeta de potencia soportará más corriente, esto debido a que el vehículo urbano pesa más que el vehículo prototipo y la corriente que se liberará en el controlador será mayor que en el vehículo prototipo.

Como se ha dicho, este controlador estará constituido de dos tarjetas, la tarjeta de control y la tarjeta de potencia, la tarjeta de control está constituida de cuatro de las cinco tarjetas implementadas en el controlador del vehículo prototipo, esto es para realizar y observar las diferencias que existen entre una implementación modular y una implementación en conjunto.

Al igual que el controlador del vehículo prototipo, este controlador debe cumplir los experimentos descritos anteriormente, pero con la diferencia de que la tarjeta de control deberá cumplir los experimentos del dos al cinco, mientras que la tarjeta de potencia deberá cumplir los mismos experimentos de la tarjeta de potencia, es decir:

## 1. Tarjeta 1 Potencia.

### Experimentos 1 (Circuito de potencia)

- a) Ruido del circuito.
- b) Estabilidad.
- c) Calentamiento.
- d) Prueba de funcionamiento.
- e) Prueba de duración.

La descripción de cada uno de estos experimentos se mencionó en la sección del vehículo prototipo, ya que son exactamente los mismos.

Como se ha venido diciendo, estos son los mínimos requerimientos que debe cumplir la tarjeta diseñada para considerarse una tarjeta funcional.

En la Figura 5.7 se muestra la tarjeta de potencia diseñada y la cual será implementada en la versión final del controlador del vehículo urbano.

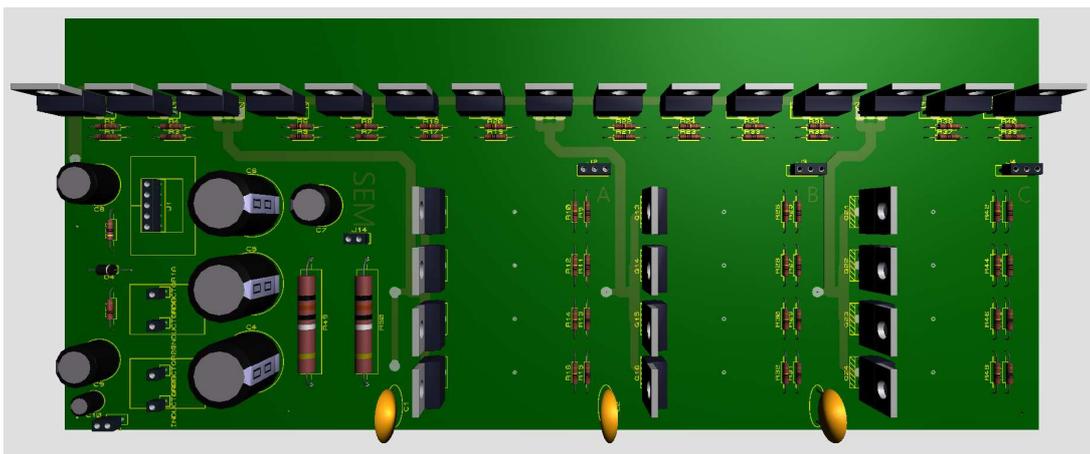


Figura 5.7: Diseño del circuito de potencia para el vehículo urbano.

## 2. Tarjeta 2 Control.

### a) Fuente de alimentación.

#### Experimentos 2 (Circuito de alimentación)

- 1) Regulación de voltaje.
- 2) Ruido.
- 3) Estabilidad.
- 4) Calentamiento.

b) **Control de corriente.**

**Experimentos 3 (Circuito de control de corriente)**

- 1) Control de corriente.
- 2) Ruido.
- 3) Estabilidad.

c) **Circuito de disparo.**

**Experimentos 4 (Circuito de disparo)**

- 1) Adquisición de sensores.
- 2) Secuencia de conmutación.
- 3) Conmutación.
- 4) Ruido en el circuito de conmutación.
- 5) Estabilidad del circuito de conmutación.

d) **Cerebro.**

**Experimentos 5 (Circuito Cerebro)**

- 1) Ruido.
- 2) Estabilidad.

La descripción de cada uno de estos experimentos se menciona con mas detalle en la sección del vehículo prototipo, ya que son exacta mente los mismos.

Como se a venido diciendo, estos son los mínimos requerimientos que debe cumplir la tarjeta diseñada para considerarse una tarjeta funcional.

En la Figura 5.8 se muestra el diseño de la tarjeta de control, la cual será implementada en la versión final del controlador del vehículo urbano.

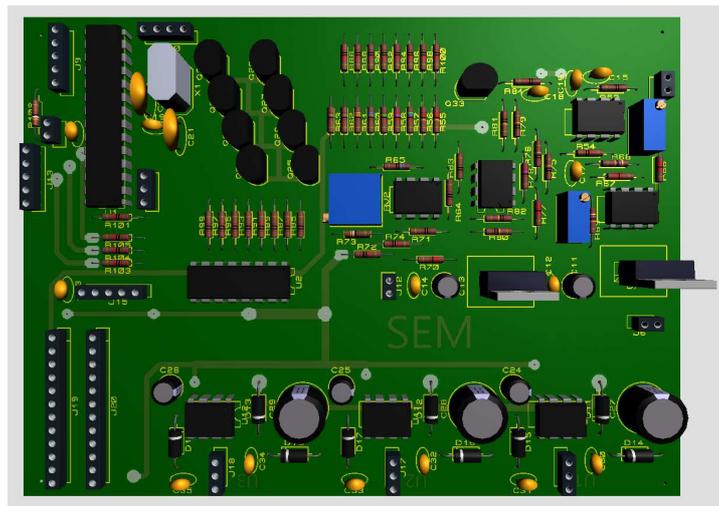


Figura 5.8: Diseño del circuito de control para el vehículo urbano.

## 5.2. Manufactura del controlador

Una vez diseñados los circuitos, tanto para el vehículo prototipo como para el vehículo urbano, se prosigue a la manufactura, la fabricación de estas tarjetas se realizó en el instituto de ingeniería con infraestructura que se construyó con anterioridad a este trabajo de tesis.

### 5.2.1. Vehículo Prototipo

Con el diseño realizado en la sección 5.1, se empieza con la fabricación del controlador del vehículo prototipo, como se ha mencionado, este controlador está constituido de cinco tarjetas, cada una con una función en específico.

Aunque en cuestión de manufactura es más trabajo el realizar cinco tarjetas, para el caso de estudio del controlador y por lo observado en versiones anteriores es la mejor opción, ya que permite escalar el controlador a cualquier necesidad específica, así como también se pueden realizar cambios en el controlador de manera sencilla.

Esto es debido a que, cambiando una tarjeta, el funcionamiento del controlador cambia debido a que todas interactúan, esto sirve para realizar un estudio del comportamiento de los circuitos, si se quiere probar otro tipo de circuito con otra configuración, ya sea el de potencia, el de disparo o cualquiera de los que está constituido, simplemente con cambiar una tarjeta, se tiene un controlador con diferentes características.

El proceso de manufactura que se siguió fue el que se ha venido empleado a lo largo de varios años, el cual es fotosensibilizar una placa fenólica, la cual previamente es perforada empleando una máquina CNC y con el circuito transferido se sumerge en cloruro férrico, un ácido empleado en la fabricación de circuitos electrónicos, el tiempo de fabricación de estos cinco circuitos sin contar el tiempo de soldado y las pruebas es de alrededor de tres horas.

Con las tarjetas listas se prosigue a soldar cada una de ellas, cuidando que la soldadura no sea inadecuada, es decir que los componentes se encuentren en contacto con la placa, esto es porque si la tarjeta no está realizada de manera correcta, el circuito podría presentar fallas por un mal soldado y al estar trabajando con electrónica de potencia, esto puede causar que el circuito completo se queme.

En la Figura 5.9 se muestran las tarjetas fabricadas (con todos los componentes soldados), las cuales constituyen el controlador del vehículo prototipo.

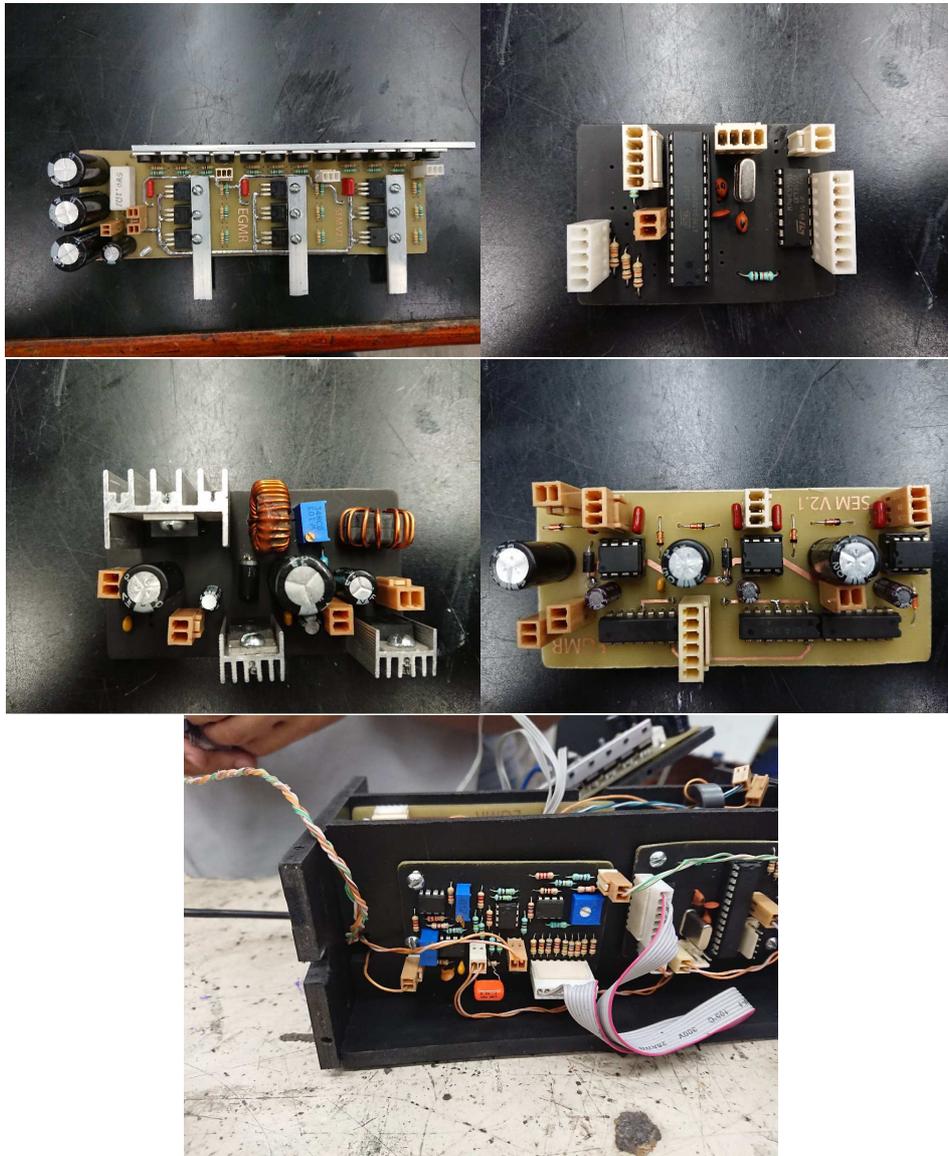


Figura 5.9: Controlador final del vehículo prototipo.

### 5.2.2. Vehículo urbano

Al igual que el caso del controlador del vehículo prototipo, se toma el diseño realizado en la sección 5.1, y se empieza el proceso de fabricación fotosensibilizando la placa fenólica para fabricar el circuito.

A diferencia del caso anterior en la que se fabricaron cinco tarjetas, en este caso se fabrican dos

tarjetas, una que es la de control y otra que corresponde a la potencia, en cuestión de tiempos sin contar el soldado y las pruebas de la misma el tiempo es igual, es decir tres horas para tener las dos tarjetas.

En la Figura 5.10 se muestran estas dos tarjetas fabricadas (con todos sus componentes soldados), las cuales constituyen el controlador del vehículo urbano.

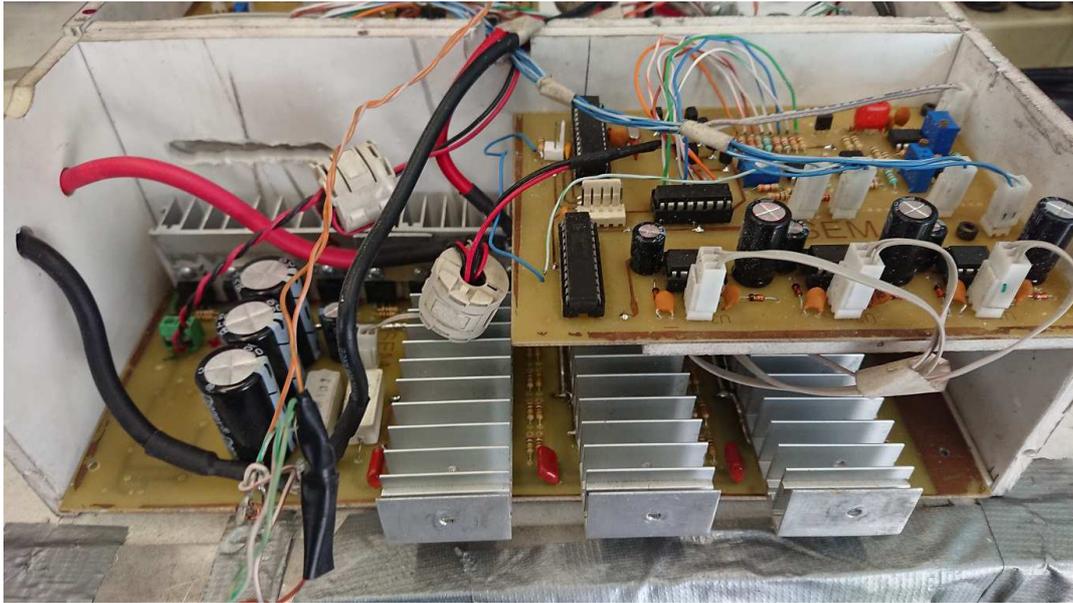


Figura 5.10: Controlador final del vehículo urbano.

**Aunque estas dos últimas secciones son cortas, son el resumen de años de trabajo, investigación e implementaciones, es decir son el resultado de todo el trabajo de tesis, en cuestión de lo que es un controlador para motores de tres fases implementados en vehículos de alta eficiencia.**

Lo que corresponde hacer ahora es el obtener el comportamiento de estas dos versiones de controlador, que aun que están basadas en una misma versión, tienen pequeñas diferencias como:

1. La unión de las tarjetas y separación de las mismas, así como también el vehículo en el que serán implementados.
2. Uno es el vehículo prototipo que tiene un único motor y el otro es el vehículo urbano con dos motores trabajando en conjunto para lograr el movimiento del automóvil.

3. El peso que deben mover cada uno de los controladores es diferente por las mismas características del vehículo.

Dichas diferencias son consideradas dentro del diseño y de igual forma en el control (software) de cada uno de los sistemas. Ya teniendo fabricados los controladores, el siguiente paso es el realizar cada una de las validaciones y llevarlos desarrollos a una implementación, lo más cercana a la realidad, pero en condiciones controladas como lo son en una pista de carreras y no en el tráfico convencional que viven los automóviles, esto principalmente porque los vehículos construidos no son de uso cotidiano, sino que son autos de competencia.

### 5.3. Resultados del controlador

Un punto importante a resaltar a estas alturas del trabajo, es que se tienen una trayectoria larga en el diseño de controladores, así como también circuitos electrónicos que permiten realizar pruebas de nuevas tarjetas, ya que por la necesidad de ir fabricando nuevas versiones de controladores que sean más eficientes para las competencias, el controlador se va modificando gradualmente, por lo que las tarjetas ya fabricadas permiten accionar las nuevas tarjetas diseñadas y construidas en este capítulo.

#### 5.3.1. Vehículo prototipo

##### 1. Potencia.

###### Resultados de los Experimentos 1 (Circuito de potencia)

###### a) Ruido del circuito.

Al encender el motor empleando la etapa de potencia, se observó en el osciloscopio que el ruido presente en el circuito no afectaba la conmutación del mismo, por lo que se concluye que en este punto el circuito de potencia es lo suficientemente robusto para soportar el ruido de la bobina, es decir que al accionar el motor la potencia no se quemará.

Faltaría verificar que la tarjeta de potencia se mantenga estable al trabajar en conjunto con las otras tarjetas correspondientes a este controlador.

###### b) Estabilidad.

Como se ha mencionado a lo largo de este trabajo, este circuito es uno de los más importantes por lo que debe pasar todas las pruebas, en este caso debe de soportar una corriente constante en presencia del ruido evaluado, para esto se enciende el motor y se deja funcionando por periodos de tiempo, observando las señales de salida

en el osciloscopio, así como la temperatura a la cual opera el circuito, después de estas pruebas se concluye que el circuito tiene la capacidad de soportar la corriente de operación de este motor.

Faltaría realizar pruebas con carga, las cuales se realizarán con todos los circuitos colocados.

c) Calentamiento.

Esta parte es la principal a evaluar, además como el circuito está fabricado en una PCB se pueden realizar pruebas más exigentes al circuito.

En este caso, se sabe que debido a la carga que estará circulando por el circuito este se va a calentar, en este caso se debe determinar qué tipo de sistema de enfriamiento requiere, para las pruebas iniciales se decidió utilizar disipadores para cada sección del circuito, así como un ventilador para así asegurar que no fallará.

En estas primeras pruebas esta solución funcionó sin problema, teniendo en cuenta que el flujo de aire no estaba dirigido, se procede a realizar pruebas sin el ventilador, al evaluar la tarjeta, se llega a la conclusión que esta etapa de potencia no necesita emplear ventilador para funcionar.

De los casos anteriores sabemos el comportamiento de general este circuito ante diferentes cargas y diferentes tiempos, además por las pruebas realizadas es posible saber cuánto se calienta el circuito, al realizar pruebas con diferentes cargas se observó que los disipadores tenían la capacidad de distribuir el calor de buena manera incluso sin un flujo de aire.

d) Prueba de funcionamiento.

Al conectar todos los circuitos, una vez evaluados, se concluye que la tarjeta funciona adecuadamente, aunque aún falta realizar pruebas sobre el vehículo.

e) Prueba de duración.

Esta es una de las pruebas más tardadas y difíciles de determinar en potencia, ya que el ingeniero que está desarrollando el controlador debe tener la capacidad de discernir cuanto tiempo es necesario en cada prueba así como bajo qué condiciones someterá al controlador, una falla en esta prueba puede causar que el circuito de potencia se quemé así como también los demás.

Es una prueba que depende en gran medida del grado de experiencia que tenga la persona que la realiza y ya que en este trabajo el desarrollar esta prueba no es un objetivo se toma como base para realizarla, la experiencia adquirida a lo largo del tiempo.

El resultado de la prueba después de estar realizando diversas combinaciones con carga, sin carga además de diferentes velocidades, niveles de ruido y temperaturas, se llega a la conclusión de que la tarjeta funciona bien en el laboratorio, pero faltaría realizar las pruebas sobre el vehículo prototipo.

Con estas pruebas, hasta este punto se puede concluir que la tarjeta es capaz de soportar un motor de 1000 [w] de potencia, aunque aún hace falta realizar pruebas más exigentes, como lo son las pruebas sobre el vehículo, en este punto esta tarjeta funciona adecuadamente en el laboratorio.

## 2. Fuente de alimentación.

### Resultados de los Experimentos 2 (Circuito de alimentación)

#### a) Regulación de voltaje.

Empleando una fuente controlada en corriente y variando el voltaje, se comprobó que el circuito provee los voltajes de trabajo, así como también que soporta el voltaje máximo de entrada (el diseño está pensado para soportar 56 [V]) proveniente de las baterías.

#### b) Ruido.

Al conectar el circuito con el motor funcionando, se verificó que la tarjeta puede amortiguar el ruido existente debido a la conmutación de las bobinas.

#### c) Estabilidad.

Al someter el circuito a su carga de operación, se verificó que el voltaje que provee el circuito se comporta de manera estable sin fluctuaciones.

#### d) Calentamiento.

Al medir la temperatura de los componentes mientras el circuito está funcionando con carga y con sus disipadores colocados se observó que el circuito funciona adecuadamente en periodos largos.

Con estas pruebas se concluye que la tarjeta está lista para funcionar en el controlador, lo que haría falta es realizar las pruebas sobre el vehículo prototipo.

## 3. Control de corriente.

### Resultados de los Experimentos 3 (Circuito de control de corriente)

#### a) Control de corriente.

Al hacer simulación de carga sobre el circuito, este se llevó a su rango máximo de operación, demostrando que el circuito cortaba la corriente.

Al llevar el circuito a su valor mínimo, el circuito de corriente permitía el paso completo, lo cual, demuestra que el circuito funciona adecuadamente.

Posteriormente se comprobó la respuesta con la señal de control de velocidad (entrada proveniente del piloto), llevando al circuito a diferentes rangos de corriente, tanto los máximos como mínimos y valores intermedios, observando en el osciloscopio su funcionamiento, el cual fue correcto.

b) Ruido.

Al comprobar la resistencia de este circuito con las bobinas funcionando, se pusieron a prueba los filtros colocados y los rangos de operación, observando que esta tarjeta se comporta estable ante el ruido proveniente del motor.

c) Estabilidad.

Como se ha mencionado este es uno de los circuitos más importantes por lo que debe pasar todas las pruebas, en este caso debe de soportar una corriente constante en presencia de ruido, para esto se enciende el motor y se deja funcionando por periodos de tiempo (estos periodos fueron de 5 min, 10 min, 30 min y 60 min), observando las señales de salida así como la temperatura a la cual está operando el circuito, después de estas pruebas se concluye que el circuito tiene la capacidad de soportar la corriente de operación de este motor.

En este punto el circuito pasó todas las evaluaciones de laboratorio, pero falta realizar una prueba más exigente, como lo es el colocar el circuito completo (el controlador) en el auto prototipo y observar cómo se comporta.

#### 4. Circuito de disparo.

##### Resultados de los Experimentos 4 (Circuito de disparo)

a) Adquisición de sensores.

Al conectar los sensores y hacer girar el motor, se comprobó que se tenía lectura de cada sensor.

b) Secuencia de conmutación.

El voltaje con el que se manda cada señal del circuito de conmutación se encuentra dentro de los rangos de diseño.

c) Conmutación.

Con los sensores leídos de manera correcta, y al hacer girar el motor se comprobó que la secuencia mandada era la esperada en el diseño.

d) Ruido en el circuito de conmutación.

Con el motor funcionando a diferentes velocidades y diferentes cargas se logró verificar la respuesta del circuito de conmutación y su comportamiento ante el ruido presente en el circuito, se logró determinar que el circuito de conmutación es capaz de soportar el ruido presente en estas pruebas.

e) Estabilidad del circuito de conmutación.

Al accionar el motor y observar el comportamiento de las señales de conmutación, se concluyó que su respuesta, aunque con ruido, era aceptable ya que no afectaba el comportamiento del motor, por lo que el circuito es capaz de trabajar con los parámetros de diseño pensados para esta versión.

El diseño y pruebas realizadas a este circuito fueron adecuadas de tal forma que, aunque hace falta realizar pruebas en conjunto con las otras cuatro tarjetas, este circuito es capaz de trabajar accionando.

## 5. Cerebro.

### Resultados de los Experimentos 5 (Circuito Cerebro)

#### a) Ruido.

Con las bobinas funcionando, se revisó el amortiguamiento del ruido sobre la tarjeta cerebro, revisando que los picos generados no causaran un fallo de funcionamiento, el resultado fue que el filtro colocado amortigua el ruido, lo suficiente para que la tarjeta funcione.

#### b) Estabilidad.

Al dejar encendido el motor con la tarjeta cerebro regulando la operación de las bobinas, se observó que las señales que se mandaban eran las adecuadas a lo largo de las pruebas, por lo que el circuito es estable en su funcionamiento.

El circuito fue probado con tarjetas fabricadas con anterioridad, las cuales ya habían sido validadas, por lo que hace falta realizar una prueba en conjunto con las nuevas tarjetas, construyendo de esta forma, el controlador que se empleará en el vehículo prototipo.

Ya con el controlador diseñado, fabricado y validado en pruebas de laboratorio, ante diferentes condiciones de velocidad, carga, así como tiempo de operación se prosigue a emplear el controlador en los vehículos fabricados en el capítulo tres de este trabajo de tesis, esto para lograr poner a prueba el sistema en un comportamiento lo más parecido a la realidad.

Para realizar las pruebas en un sistema como lo es un vehículo y debido a que esto es un desarrollo, es importante tomar en cuenta varios factores, ya que, aunque se han realizado pruebas en laboratorio, aún existe la incertidumbre si el controlador funcionará correctamente, por lo que por experiencia en este tipo de desarrollos se recomienda ir realzando las pruebas con la corriente limitada e ir liberando, conforme sea necesario así como también observando y tomando nota del comportamiento del controlador.

Se empezará con el vehículo prototipo, sobre el cual se colocará el controlador correspondiente. Previo a los experimentos sobre pista se decide diseñar un sistema que permita probar el vehículo prototipo en movimiento pero permitiendo obtener información del comportamiento del controlador, para esto se diseñan y construyen unos rodillos, los cuales permiten que el motor funcione con la carga del vehículo pero de manera estática, esta idea se muestra en la Figura 5.11, y es el lugar donde inicialmente se probó el controlador.



Figura 5.11: Sistema de pruebas para controladores.

Aunque este sistema es muy simple y rudimentario, es de gran utilidad ya que permite analizar el comportamiento del controlador sobre un vehículo, facilitando la limitación de los parámetros de funcionamiento que se deben fijar en el controlador para obtener la mejor operación del vehículo.

Para este caso, el controlador y el vehículo fueron fabricados y diseñados para la formula Shell, por lo que el vehículo debía cumplir ciertos requerimientos de velocidad para lograr cumplir la competencia con éxito, además de eso, al tratarse de una competencia de eficiencia y no de velocidad el controlador debe estar en el mejor punto posible de operación, datos que pueden ser obtenidos de este modo.

Adicional a este sistema se diseñó y construyó un sistema de telemetría que permite conocer el comportamiento del vehículo en pista, midiendo corriente, temperatura, voltaje, frenado, velocidad, posición y mandando todo a un sistema central.

Como ya se mencionó, el sistema de rodillos sirve para calibrar el controlador de aquí partimos a realizar el ajuste final de tal forma que el controlador sea eficiente y el vehículo alcance la velocidad necesaria para cumplir con la competencia, con esto en mente se realiza la siguiente secuencia, que, aunque parece obvia para algunos puede llegar a ser de utilidad si están empezando a realizar este tipo de desarrollos.

### PASOS SEGUIDOS

1. Conectamos el controlador a una fuente controlada tanto de corriente como de voltaje, el valor de voltaje se ajusta a un cuarto de las características del controlador para este caso 12 [V] con una corriente en cero.

2. Se enciende la fuente y gradualmente se sube la corriente, para este caso se contaba con una fuente de máximo seis amperes.
3. Cuando la corriente se mantenga estable debido a la energía que consume la electrónica, se procede a encender el motor.
4. Se observa el comportamiento del vehículo con el motor consumiendo una corriente de un amperio, después dos amperios, tres amperios y así sucesivamente, siempre cuidando el controlador, ya que se inicia en el punto de control de corriente mínimo.
5. Se repite el experimento anterior (punto 4), pero en este caso se va liberando gradualmente el control de corriente (estos experimentos están sujetos a la observación tanto del automóvil como del controlador).
6. Si se observa que el vehículo no se mueve al haber liberado la corriente a la mitad de la capacidad del controlador, se incrementa el voltaje a la mitad de la capacidad del controlador (24 [V]), de igual forma si el motor se mueve se incrementa el voltaje a la mitad de la capacidad del controlador, pero iniciando en 12 [V] y se va subiendo gradualmente.
7. Se observa el comportamiento del vehículo con el motor con una corriente de un amperio, luego con dos amperios, tres amperios y así sucesivamente, siempre cuidando el controlador, y con en el punto de control de corriente mínimo.
8. Si el motor se está moviendo, observar la temperatura del controlador durante periodos de tiempo (el tiempo lo decide el diseñador).
9. Liberar la corriente completamente, pero cuidando no exceder el límite al cual fue diseñado el controlador, regulando con la fuente el límite de la misma.
10. Para este caso se contaba con una fuente de 6 [A] a 30 [V], con la cual se logró encender el motor.
11. Después se realizó un cambio ya que la fuente trabaja a 6 [A] y 30 [V] conectando en paralelo, por lo que al conectar en serie se tiene un voltaje de 60 [V] a 3 [A], en este caso fue para llevar al controlador a su punto de operación de 56 [V] con las baterías cargadas al 100%.
12. Al igual que en los primeros casos, la corriente está controlada, tanto por la fuente como por el mismo controlador, la corriente máxima empleada por la fuente fue de 2.5 [A] para no dañar la fuente y a un voltaje de 56 [V].
13. Se enciende la fuente y posteriormente el controlador, liberando la corriente hasta que el motor se mueva, si no se mueve puede deberse a que requiere una mayor cantidad de corriente, depende de la aplicación, para este caso el motor se movió y se liberó la corriente del controlador en su totalidad,

14. Con estas condiciones se mide la velocidad que se alcanza y se observa la temperatura del controlador a lo largo del tiempo (el tiempo del experimento queda a consideración del diseñador).
15. Ya con estas pruebas y debido a que no se dispone de otro equipo, se procede a conectar un banco de baterías.
16. Se inicia con un banco de la mitad de la capacidad en voltaje, para este caso de 24 [V] y al controlador, se le restringe la corriente en su totalidad.
17. Se enciende el vehículo y se va liberando la corriente gradualmente, observando el comportamiento del controlador.
18. En este caso la liberación de la corriente no debe superar el 50 %, hasta estar seguros de que el controlador funciona adecuadamente dentro de sus parámetros, además se debe ir midiendo la velocidad que alcanza el vehículo.
19. Si las pruebas resultan satisfactorias se procede a elevar el voltaje a  $\frac{3}{4}$  del voltaje máximo, en este caso 36 [V] y al controlador se le restringe la corriente en su totalidad.
20. Se enciende el vehículo y se va liberando la corriente gradualmente, observando el comportamiento del controlador y la temperatura.
21. La liberación de la corriente no debe superar el 50 %, hasta estar seguros de que el controlador funciona adecuadamente dentro de sus parámetros, además se debe ir midiendo la velocidad que alcanza el vehículo.
22. Por último, se conecta el controlador al voltaje de operación y se repite el proceso, restringiendo la corriente al máximo.
23. Se enciende el vehículo y se va liberando la corriente gradualmente, observando el comportamiento del controlador, la temperatura y midiendo la velocidad.
24. Para este punto si todo funcionó adecuadamente, el vehículo está listo para quedarse funcionando por periodos más largo (para nuestro caso, al menos una hora ya que es más que el tiempo que durará el vehículo en la competencia).
25. Si el controlador en este punto no funciona adecuadamente, será debido a un error de diseño, ya sea en el arreglo de los componentes, disipación de temperatura, control de corriente, manufactura, etc. eso dependerá del tipo de falla que presente.
26. Para nuestro caso el vehículo funcionó adecuadamente con su controlador, alcanzando sin problemas una velocidad de 45 [km/h] con una liberación de corriente del 65 %.

Con esto el controlador del vehículo está listo para probarse en pista y obtener información del consumo, forma de manejo del conductor, y pruebas de los algoritmos de control programados.

### 5.3.2. Vehículo urbano

Como ya se mencionó con anterioridad, este controlador estará constituido de dos tarjetas, a diferencia del anterior que está constituido de cinco tarjetas, por lo que los experimentos se que realizan a pesar de que son los mismos, en algunos casos se hace en conjunto con todas las tarjetas ya que están incluidas en el diseño de una única tarjeta fenólica.

Un punto importante que resaltar es, el resaltar que de este controlador se fabricarán y harán la evaluación de dos controladores, ya que el vehículo urbano emplea dos motores de 1000 [W] para moverse.

#### 1. Tarjeta 1 Potencia.

##### Resultados de los Experimentos 1 (Circuito de potencia)

###### a) Ruido del circuito.

Al encender el motor empleando la etapa de potencia (se empleó una tarjeta ya fabricada para realizar estas pruebas), se observó en el osciloscopio que el ruido presente en el circuito no afectaba la conmutación del mismo, por lo que se concluye que en este punto el circuito de potencia es lo suficientemente robusto para soportar el ruido de la bobina, es decir que al accionar el motor la potencia no se quemará debido al ruido presente.

Faltaría verificar que la tarjeta de potencia se mantenga estable al trabajar en conjunto con las otras tarjetas correspondientes a este controlador, así como también el realizar pruebas sobre el vehículo urbano y trabajando en conjunto con el otro controlador.

###### b) Estabilidad.

Como se ha mencionado a lo largo de este trabajo, este circuito es uno de los más importantes por lo que debe pasar todas las pruebas, en este caso debe de soportar una corriente constante en presencia del ruido evaluado, para esto se enciende el motor y se deja funcionando por periodos de tiempo (5 min, 10 min, 20 min, 30 min y 60 min).

Se observaron las señales de salida en el osciloscopio, así como la temperatura a la cual opera el circuito, después de estas pruebas se concluye que el circuito tiene la capacidad de soportar la corriente de operación de este motor, aunque faltaría realizar pruebas con carga, las cuales se realizarán con todos los circuitos colocados, así como sobre el vehículo.

###### c) Calentamiento.

Esta parte es la principal a evaluar, además como el circuito está fabricado en una PCB se pueden realizar pruebas más exigentes y durante periodos de tiempo más largos.

En este caso, se sabe que debido a la carga que estará circulando por el circuito este se va a calentar, en mayor medida que el controlador del vehículo prototipo, ya que mueve un peso mayor. Para este caso se determina qué el sistema de enfriamiento que se requiere es disipadores de aluminio y para las pruebas iniciales se decidió utilizar un ventilador, para así asegurar que el controlador no fuera a fallar.

En estas primeras pruebas esta solución funcionó (pruebas de laboratorio), pero en este caso se emplearán dos controladores en paralelo, por lo que hará falta evaluar el funcionamiento de los dos controladores funcionando en paralelo y con el vehículo funcionando, para así asegurar que el controlador no se caliente y decidir si requiere o no un ventilador.

De los casos anteriores sabemos el comportamiento de general este circuito ante diferentes cargas y diferentes tiempos, además por las pruebas realizadas es posible saber cuánto se calienta el circuito, al realizar pruebas con diferentes cargas se observó que los disipadores tenían la capacidad de distribuir el calor de buena manera, pero aun faltando la prueba sobre el vehículo.

*d) Prueba de funcionamiento.*

Al conectar todos los circuitos, una vez evaluados, se concluye que la tarjeta funciona adecuadamente en el laboratorio, aunque aún falta realizar pruebas sobre el vehículo y con los dos controladores trabajando en paralelo.

*e) Prueba de duración.*

Esta es una de las pruebas más tardadas y difíciles de determinar en potencia, ya que el ingeniero que está desarrollando el controlador debe tener la capacidad de discernir cuanto tiempo es necesario en cada prueba, así como bajo qué condiciones someterá al controlador, una falla en esta prueba puede causar que el circuito de potencia se quemara, así como también los demás circuitos que lo integran.

Es una prueba que depende en gran medida del grado de experiencia que tenga la persona que la realiza y ya que, en este trabajo, el desarrollar esta prueba no es un objetivo se toma como base para realizarla, la experiencia adquirida a lo largo del tiempo y lo observado en todos los controladores que se han fabricado.

El resultado de la prueba después de estar realizando diversas combinaciones con carga, sin carga además de diferentes velocidades, niveles de ruido y temperaturas, se llega a la conclusión de que en este punto el controlador funciona bien en el laboratorio, pero es necesario realizar pruebas sobre el vehículo.

Con estas pruebas, hasta este punto se puede concluir que la tarjeta es capaz de soportar un motor de 1000 [w] de potencia, aunque aún hace falta realizar pruebas más exigentes, como lo son las pruebas sobre el vehículo ya que ahí estará trabajando en paralelo con otro motor de 1000 [W], además de que estará sometido a condiciones más reales a las del laboratorio.

## 2. Tarjeta 2 Control.

En este caso, y a diferencia del controlador del vehículo prototipo esta tarjeta estará integrada de cuatro de las tarjetas que constituyen al controlador, por lo que los experimentos realizados sobre esta tarjeta se tendrán que realizar en conjunto ya que forman parte del mismo circuito.

### a) Fuente de alimentación.

#### Resultados de los Experimentos 2 (Circuito de alimentación)

##### 1) Regulación de voltaje.

Empleando una fuente controlada en corriente y variando el voltaje, se comprobó que el circuito provee los voltajes de trabajo, así como también que soporta el voltaje máximo de entrada (el diseño está pensado para soportar 56 [V]), en este caso esta es la primera parte del circuito que se soldó, ya que se requiere para que esta tarjeta funcione.

##### 2) Ruido.

Al conectar el circuito con el motor funcionando, se verificó que la tarjeta puede amortiguar el ruido existente debido a la conmutación de las bobinas, esta prueba se realizó con otro de los circuitos que ya se tenían fabricados, conectando el circuito a las baterías y observando cómo se comporta el circuito con el motor encendido.

##### 3) Estabilidad.

Al someter al circuito a su carga de operación, se verificó que el voltaje que provee el circuito se comporta de manera estable (sin fluctuaciones en el voltaje que provee).

##### 4) Calentamiento.

Al medir la temperatura de los componentes mientras el circuito está funcionando con carga, se observó que el circuito funciona adecuadamente en periodos largos colocando un disipador pequeño en los componentes.

### b) Control de corriente.

#### Resultados de los Experimentos 3 (Circuito de control de corriente)

##### 1) Control de corriente.

Al hacer simulación de carga sobre el circuito, este se llevó a su rango máximo de operación, demostrando que el circuito cortaba la corriente.

Al llevar el circuito a su valor mínimo, el circuito de corriente permitía el paso completo, lo cual, demuestra que el circuito funciona adecuadamente.

Posteriormente se comprobó la respuesta con la señal de control de velocidad, llevando al circuito a diferentes rangos de corriente, tanto los máximos como mínimos y valores intermedios, observando en el osciloscopio su funcionamiento, el cual fue correcto.

## 2) Ruido.

Al comprobar la resistencia ante el ruido de este circuito con las bobinas funcionando, se pusieron a prueba los filtros colocados y los rangos de operación, observando que esta tarjeta se comporta estable ante el ruido proveniente del motor.

## 3) Estabilidad.

Como se ha mencionado este es uno de los circuitos más importantes por lo que debe pasar todas las pruebas, en este caso debe de soportar una corriente constante en presencia de ruido, para esto se enciende el motor y se deja funcionando por periodos de tiempo (estos periodos fueron de 5 min, 10 min, 30 min y 60 min), observando las señales de salida así como la temperatura a la cual está operando el circuito, después de estas pruebas se concluye que el circuito tiene la capacidad de soportar la corriente de operación de este motor.

Un punto importante a resaltar es, que estas pruebas se realizaron dos veces, una para cada tarjeta, los componentes se fueron soldando gradualmente, es decir la sección correspondiente al circuito de disparo y el circuito cerebro no han sido soldadas a la tarjeta en este momento, por lo que las pruebas van incluyendo únicamente el circuito de corriente y el de fuente de alimentación.

c) **Circuito de disparo.****Resultados de los Experimentos 4 (Circuito de disparo)**

## 1) Adquisición de sensores.

Al conectar los sensores y hacer girar el motor, se comprobó que se tenía lectura de cada sensor.

## 2) Secuencia de conmutación.

El voltaje con el que se manda cada señal del circuito de conmutación se encuentra dentro de los rangos de diseño.

## 3) Conmutación.

Con los sensores leídos de manera correcta, y al hacer girar el motor se comprobó que la secuencia mandada el circuito era las esperadas en el diseño.

## 4) Ruido en el circuito de conmutación.

Con el motor funcionando a diferentes velocidades y diferentes cargas se logró verificar la respuesta del circuito de conmutación y su comportamiento ante el ruido presente, además se logró determinar que el circuito de conmutación es capaz de soportar el ruido existente en estas pruebas.

## 5) Estabilidad del circuito de conmutación.

Al accionar el motor y observar el comportamiento de las señales de conmutación, se concluyó que su respuesta, aunque con ruido, era aceptable ya que no afectaba el comportamiento del motor, por lo que el circuito es capaz de trabajar dentro de los parámetros de diseño, pensados para esta versión.

En este punto, el circuito fue probado con tres de los diseños soldados, empleando la tarjeta cerebro del controlador anterior para realizar las pruebas de funcionamiento.

*d) Cerebro.*

**Resultados de los Experimentos 5 (Circuito Cerebro)**

1) Ruido.

Con las bobinas funcionando, se revisó el amortiguamiento del ruido sobre la tarjeta cerebro, revisando que los picos generados no causaran un fallo de funcionamiento, el resultado fue que el filtro colocado amortigua el ruido, lo suficiente para que la tarjeta funcione.

2) Estabilidad.

Al dejar encendido el motor con la tarjeta cerebro regulando la operación de las bobinas, se observó que las señales que se mandaban eran las adecuadas a lo largo de las pruebas, por lo que el circuito es estable en su funcionamiento.

Ya con las dos tarjetas se tiene el controlador, fabricado y validado en pruebas de laboratorio, ante diferentes condiciones de velocidad del motor, carga, así como tiempo de operación, ahora se prosigue a emplear el controlador en el vehículo urbano fabricado en el capítulo tres de este trabajo de tesis, esto para lograr poner a prueba el sistema en un comportamiento lo más parecido a la realidad.

Además, un punto importante a resaltar es que, aunque el circuito se encuentra funcionando dentro de los parámetros pensados, el controlador no se comporta de la misma forma que el controlador del vehículo prototipo, este circuito tiene presente en su funcionamiento un ruido mayor, lo que causa que al comparar los dos controladores, este sea menos resistente al ruido que la versión anterior.

Para realizar las pruebas en un sistema como lo es un vehículo y debido a que esto es un desarrollo, es importante tomar en cuenta varios factores, ya que, aunque se han realizado pruebas en el laboratorio, aún existe incertidumbre principalmente si el controlador funcionará correctamente, en especial este circuito, cuya evaluación lo hace más propenso al ruido que la versión anterior, por la experiencia en este tipo de desarrollos se recomienda ir realizando pruebas con la corriente limitada e ir liberando gradualmente, conforme sea necesario, así como también observando y tomando nota del comportamiento del controlador.

Para esto, se empieza con las mismas pruebas realizadas para el controlador del vehículo prototipo, colocando el auto (Kalani V1) sobre los rodillos tal y como se muestra en la Figura 5.12, como en este caso el controlador del vehículo urbano está constituido de cuatro tarjetas que forman dos controladores (Figura 5.13), se realizan pruebas por separado de cada controlador, para así verificar y calibrar cada uno de los controladores, previo a realizar la conexión de los dos controladores, con los dos motores y hacerlos trabajar en paralelo, esta prueba se realizará al final, una vez que todo esté colocado en el vehículo urbano.



Figura 5.12: Controlador del vehículo urbano probado en el vehículo prototipo.

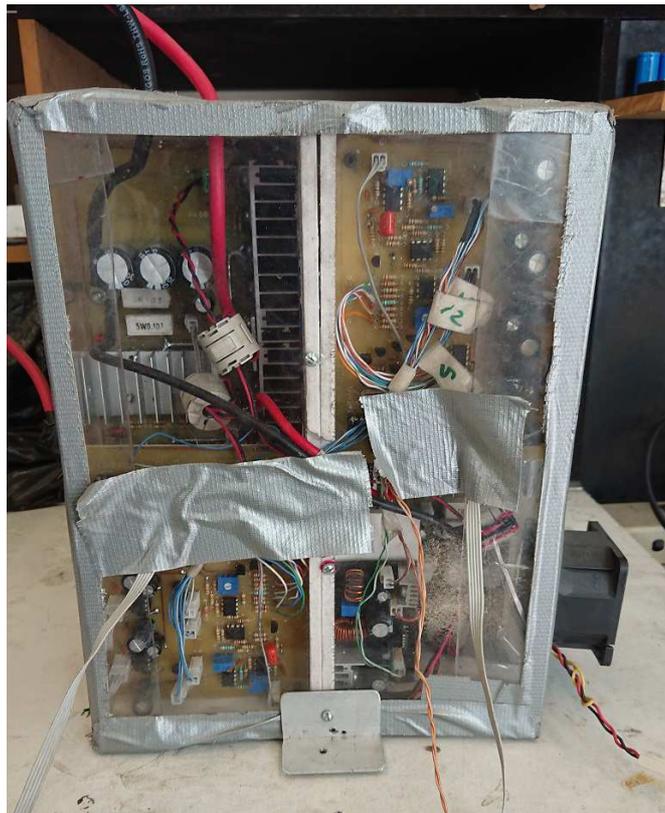


Figura 5.13: Controlador final del vehículo urbano en su caja.

Con lo anterior, se prosigue a realizar pruebas de funcionamiento y calibración para dejar el controlador del vehículo urbano listo para funcionar en pista, los pasos que se siguieron, son muy similares a las realizadas en el controlador del vehículo prototipo, estos pasos se muestran a continuación.

### **PASOS SEGUIDOS PARA EL CONTROLADOR DEL VEHÍCULO URBANO**

1. Conectamos el controlador a una fuente controlada tanto de corriente como de voltaje, el valor de voltaje se ajusta a un cuarto de las características del controlador para este caso 12 [V] con una corriente en cero.
2. Se enciende la fuente y gradualmente se sube la corriente, para este caso se contaba con una fuente de máximo seis amperes.
3. Cuando la corriente se mantenga estable debido a la energía que consume la electrónica, se procede a encender el motor.
4. Se observa el comportamiento del vehículo con el motor consumiendo una corriente de un amperio, después dos amperios, tres amperios y así sucesivamente, siempre cuidando el controlador, ya que se inicia en el punto de control de corriente mínimo.
5. Se repite el experimento anterior (punto 4), pero en este caso se va liberando gradualmente el control de corriente (estos experimentos están sujetos a la observación tanto del automóvil como del controlador).
6. Si se observa que el vehículo no se mueve al haber liberado la corriente a la mitad de la capacidad del controlador, se incrementa el voltaje a la mitad de la capacidad del controlador (24 [V]), de igual forma si el motor se mueve se incrementa el voltaje a la mitad de la capacidad del controlador, pero iniciando en 12 [V] y se va subiendo gradualmente.
7. Se observa el comportamiento del vehículo con el motor con una corriente de un amperio, luego con dos amperios, tres amperios y así sucesivamente, siempre cuidando el controlador, y con en el punto de control de corriente mínimo.
8. Si el motor se está moviendo, observar la temperatura del controlador durante periodos de tiempo (el tiempo lo decide el diseñador).
9. Liberar la corriente completamente, pero cuidando no exceder el límite al cual fue diseñado el controlador, regulando con la fuente el límite de la misma.
10. Para este caso se contaba con una fuente de 6 [A] a 30 [V], con la cual se logró encender el motor.

11. Después se realizó un cambio ya que la fuente trabaja a 6 [A] y 30 [V] conectando en paralelo, por lo que al conectar en serie se tiene un voltaje de 60 [V] a 3 [A], en este caso fue para llevar al controlador a su punto de operación de 56 [V] con las baterías cargadas al 100%.
12. Al igual que en los primeros casos, la corriente está controlada, tanto por la fuente como por el mismo controlador, la corriente máxima empleada por la fuente fue de 2.5 [A] para no dañar la fuente y a un voltaje de 56 [V].
13. Se enciende la fuente y posteriormente el controlador, liberando la corriente hasta que el motor se mueva, si no se mueve puede deberse a que requiere una mayor cantidad de corriente, depende de la aplicación, para este caso el motor se movió y se liberó la corriente del controlador en su totalidad,
14. Con estas condiciones se mide la velocidad que se alcanza y se observa la temperatura del controlador a lo largo del tiempo (el tiempo del experimento queda a consideración del diseñador).
15. Ya con estas pruebas y debido a que no se dispone de otro equipo, se procede a conectar un banco de baterías.
16. Se inicia con un banco de la mitad de la capacidad en voltaje, para este caso de 24 [V] y al controlador, se le restringe la corriente en su totalidad.
17. Se enciende el vehículo y se va liberando la corriente gradualmente, observando el comportamiento del controlador.
18. En este caso la liberación de la corriente no debe superar el 50%, hasta estar seguros de que el controlador funciona adecuadamente dentro de sus parámetros, además se debe ir midiendo la velocidad que alcanza el vehículo.
19. Si las pruebas resultan satisfactorias se procede a elevar el voltaje a  $\frac{3}{4}$  del voltaje máximo, en este caso 36 [V] y al controlador se le restringe la corriente en su totalidad.
20. Se enciende el vehículo y se va liberando la corriente gradualmente, observando el comportamiento del controlador y la temperatura.
21. La liberación de la corriente no debe superar el 50%, hasta estar seguros de que el controlador funciona adecuadamente dentro de sus parámetros, además se debe ir midiendo la velocidad que alcanza el vehículo.
22. Por último, se conecta el controlador al voltaje de operación y se repite el proceso, restringiendo la corriente al máximo.
23. Se enciende el vehículo y se va liberando la corriente gradualmente, observando el comportamiento del controlador, la temperatura y midiendo la velocidad.

24. Para este punto si todo funcionó adecuadamente, el vehículo está listo para quedarse funcionando por periodos más largo (para nuestro caso, al menos una hora ya que es más que el tiempo que durará el vehículo en la competencia).
25. Si el controlador en este punto no funciona adecuadamente, será debido a un error de diseño, ya sea en el arreglo de los componentes, disipación de temperatura, control de corriente, manufactura, etc. eso dependerá del tipo de falla que presente.
26. Para nuestro caso el vehículo funcionó adecuadamente con el controlador, alcanzando sin problemas una velocidad de 45 [km/h] con una liberación de corriente del 65 %.
27. Los pasos realizados hasta este punto son para calibrar uno de los dos controladores, por lo que previo a realizar la conexión de los dos motores trabajando en paralelo, se deben repetir los pasos del 1 al 26 con el otro controlador.
28. Pero la diferencia principal con el controlador del vehículo prototipo es que, los dos controladores deben estar trabajando en los mismos rangos de velocidad ante la misma carga, por lo que el valor de velocidad debe ser muy cercano entre los dos controladores.

Con estas pruebas, el controlador del vehículo urbano está listo para probarse en pista con el vehículo y obtener información del consumo, forma de manejo del conductor, y pruebas de los algoritmos de control programados, además del funcionamiento de los dos motores trabajando en paralelo.

## 5.4. Cargador y BMS

Por lo visto y aprendido a lo largo de este trabajo de tesis, así como también al analizar la necesidad presente, se observó que el BMS y el cargador para estos dos vehículos pueden ser implementados en un único circuito.

Esto es partiendo del hecho de que se tienen los diseños base, tanto del BMS como del cargador para el banco de baterías empleado en los vehículos.

Se inicia el diseño del BMS final, el cual para los dos vehículos será implementado con el mismo BMS, esto debido a las características del banco de baterías base del diseño, este BMS permitirá cambiar algunos parámetros tanto de componentes como de control (software) que escalan el sistema a la necesidad que se tenga.

Posteriormente se realiza la integración del diseño del cargador, el cual al igual que el BMS se puede escalar al tamaño del banco de baterías, pero para los dos casos, los bancos de baterías son muy similares por lo que el cargador en cuestión de potencia no se verá afectado por el incremento en la carga.

### 5.4.1. Diseño del cargador y del BMS VF1

Partiendo de lo ya presentado anteriormente se prosigue al diseño de un nuevo BMS, así como también del nuevo cargador que trabajará en conjunto con el BMS y estará integrado en la misma tarjeta, esta arquitectura se muestra en la Figura 5.14, donde de manera general se representa el esquema bajo el cual está constituido este diseño.

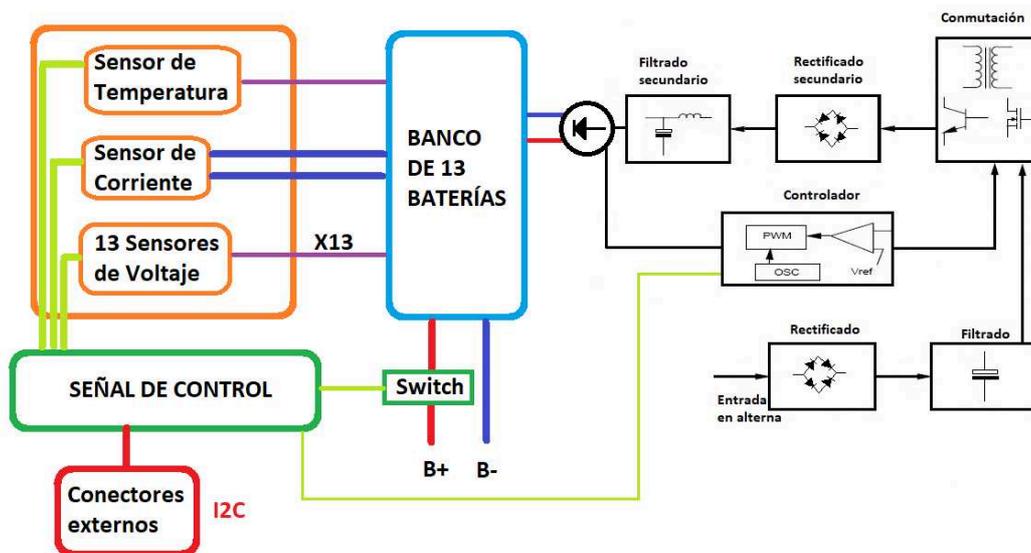


Figura 5.14: Esquema final del BMS con cargador integrado.

Al igual que en todos los casos que se han venido trabajando, el diseño debe cumplir unos requerimientos mínimos (el diseño es realizado pensando en los requerimientos y en que sea capaz de pasar estas pruebas), los cuales se han ido obteniendo a lo largo de la experiencia y por el trabajo realizado hasta este momento, estos se mencionan como resumen a continuación.

A diferencia de los experimentos anteriores es que, en este caso se incorporan las pruebas que se deben realizar al cargador, así como también incorporar las pruebas que involucran a los dos sistemas trabajando en conjunto.

Como este tipo de configuración es nueva, se decide realizar varias versiones, principalmente para ver el acomodo de los componentes y el ir evaluando la mejor configuración de elementos.

También es importante resaltar que al igual que en el caso del controlador, el diseño fue probado y verificado en protoboar, aunque no se muestran imágenes de esto, es de gran importancia el verificar que el circuito se comporta como se desea y de no ser así, realizar el cambio antes de la manufactura.

Los experimentos a realizar en este caso se mencionan a continuación, donde se incorporan las pruebas de las dos tarjetas así como las de conjunto.

### Experimentos para el BMS

#### 1. Sensado.

##### a) Circuito de Voltaje.

Se revisa que el circuito funcione de manera estable, que la salida de voltaje corresponda al voltaje de cada una de las baterías.

##### b) Circuito de corriente.

Se revisa que el circuito de corriente lea la corriente adecuada, así como también asegurar su funcionamiento.

##### c) Circuito de Temperatura.

Caracterizar el circuito para obtener el valor de temperatura adecuado.

#### 2. Control de corriente.

Realizar pruebas de funcionalidad del circuito de corriente (comportamiento de la salida de control de la corriente) ante diferentes rangos de operación, máxima corriente, mínima corriente.

#### 3. Regulación de voltaje.

Revisar que el circuito de regulación soporte el voltaje de entrada Máximo (56 [V]), que regule el voltaje a los rangos que se emplearán en toda la tarjeta y verificar estabilidad ante una carga constante.

#### 4. Ruido.

##### a) Circuito de Voltaje.

Verificar que, una vez que el motor esté accionado, el ruido presente en la medición del banco de baterías sea mínimo.

##### b) Circuito de Temperatura.

Verificar el valor que arroja el circuito ante la perturbación de la bobina.

##### c) Cerebro o generación de señales.

Una vez accionada la bobina, el retorno de corriente afecta a todo el circuito, por eso la importancia de los filtros y el control del ruido, este ruido afecta de igual manera al cerebro del sistema, y si es demasiado puede ocasionar que el circuito deje de funcionar, afectando las señales de control del BMS.

*d)* Circuito de corriente.

Debido al ruido de la bobina y como este circuito está directamente involucrado en el punto de entrada y salida de la energía, si el ruido presente es mayor al filtrado y esperado en el diseño, el control de corriente puede medir valores que no son correctos, causando que la medición no sea correcta.

5. Estabilidad.

*a)* Circuito de Voltaje.

Una vez accionado el motor, se revisa la estabilidad en la salida de voltaje y se compara con el estado sin el motor accionado.

*b)* Circuito de corriente.

Una vez accionado el motor, se revisa la estabilidad en la salida de voltaje y se compara con el estado sin el motor accionado.

*c)* Circuito de Temperatura.

Una vez accionado el motor, se revisa la estabilidad en la salida de voltaje y se compara con el estado sin el motor accionado.

*d)* Cerebro.

Se revisa que las señales de entrada y salida de la tarjeta de control funcione adecuadamente ante la perturbación de la bobina.

6. Calentamiento del circuito de regulación.

Debido a que el circuito de regulación es el que se encarga de suministrar la energía a la electrónica, este sufre calentamiento debido a la carga que transita sobre él, por lo que es importante verificar que, colocando la carga de operación, el circuito funcione sin un calentamiento excesivo (dentro de los parámetros de los componentes).

7. Estabilidad del circuito en conjunto.

Debido a que todos los circuitos tienen el objetivo de monitorear todos los parámetros de las baterías y reaccionar de acuerdo a una programación específica (colocada en el cerebro del BMS), es importante verificar que todos trabajen en sincronía, con y sin el motor accionado (con el ruido de la bobina presente), ya que, si no trabajan en conjunto, el BMS no funcionará correctamente, esta prueba se hace durante periodos de tiempo (definidos por el diseñador) para así asegurar que todo trabaje adecuadamente.

8. Comunicación.

*a)* Estabilidad.

Debido a que el circuito de comunicación se encuentra siempre mandando información, es importante revisar que la trama del mismo se mantenga a lo largo del tiempo, así como también que mande la información correcta.

*b)* Ruido.

Revisar una vez encendido el motor, que la comunicación permanezca a lo largo del tiempo, anulando el ruido presente con los filtros que sean necesarios.

### Experimentos para el Cargador

1. Conmutación.

Revisar que el circuito genere un PWM a una frecuencia fija para activar la bobina.

2. Rectificado.

Revisar que el voltaje a la salida de la bobina se vuelva un voltaje en corriente directa.

3. Filtrado.

Revisar que el voltaje a la salida de los capacitores, colocados a la salida del rectificado, reduzcan el rizo del voltaje.

4. Control.

*a)* Revisar que el circuito al conectar una carga constante menor a dos amperes mantenga el voltaje en 56 [V].

*b)* Revisar que el circuito al conectar una carga superior a dos amperes mantenga el control de la corriente limitada a dos amperes.

5. Calentamiento.

Revisar el calentamiento que sufre el circuito al estar con una carga constante de dos amperes durante un periodo de tiempo, verificando que el circuito no falle en el tiempo debido a la temperatura del circuito.

6. Estabilidad.

Revisar que el circuito con una carga constante se mantenga estable a lo largo del tiempo permitiendo alcanzar el voltaje de carga máxima de las baterías, esta prueba se hace conectando el banco de baterías.

### Experimentos en conjunto

1. Comunicación.

Revisar que los circuitos trabajen en conjunto, si el BMS detecta valores incorrectos, es decir si el cargador está funcionando los dos circuitos deben realizar las acciones de protección del banco de baterías.

## 2. Regulación de voltaje.

Revisar que los voltajes se mantengan estables al alimentarse los dos circuitos en simultáneo.

Aunque el texto correspondiente a los experimentos se repite una y otra vez a lo largo de este trabajo, es **importante resaltar que es parte de lo que se ha encontrado y se consideran como parte fundamental de la investigación y aprendizaje, ya que se han ido desarrollando y llevado a cabo de acuerdo a las necesidades encontradas**, así como también son considerados como puntos a seguir para reducir las fallas existentes en el diseño de este tipo de electrónica.

Dicho lo anterior y tomando en cuenta las necesidades se prosigue a realizar un diseño del BMS con el cargador integrado, el cual será implementado tanto en el banco de baterías del vehículo prototipo como en el vehículo urbano.

Este primer diseño se muestra en la Figura 5.15, el cual está constituido de un BMS con la capacidad de monitorear 13 baterías que en este caso trabajan en un rango de 3.5 [V] a 4.2 [V] (el banco de baterías completo trabaja en el rango de 45.5 [V] a 54.6 [V]), con una temperatura máxima de 50 [°C] y una corriente, que de acuerdo a la necesidad se puede modificar para así poderse implementar en los dos vehículos, pero por protección de las baterías estas solo pueden proveer un máximo de 10 [A].

En el caso del cargador que también está mostrado en la Figura 5.15, trabaja cargando el banco de baterías a un voltaje máximo de 56 [V], y con una corriente controlada máxima de 2 [A], la forma en que esta versión de cargador funciona es; a medida que el voltaje va aumentando, la corriente va disminuyendo, tal y como se muestra en la Figura 1.6 del capítulo 1 de este trabajo.

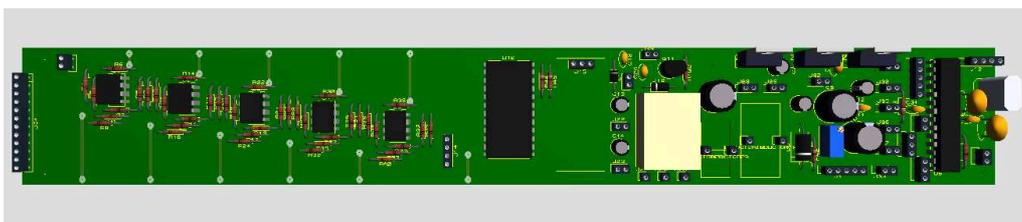


Figura 5.15: Diseño de BMS VF1.

### 5.4.2. Manufactura del cargador y del BMS VF1

Con este primer diseño realizado en este tipo de configuración, se prosigue a realizar la manufactura de este circuito, el cual será evaluado con los experimentos descritos anteriormente, este

diseño fabricado en PCB con todos los componentes soldados se muestra en la Figura 1.6, donde además de mostrar el BMS con cargador, también se muestra el cargador del capítulo anterior para que sea más evidente la ubicación del cargador en la tarjeta.

Hay que resaltar que, en este punto, este diseño es el primero que se realiza en conjunto, por lo que aún se puede mejorar, no solamente en el arreglo de componentes empleados, sino también en la forma del acomodo de los mismos, cosa que se puede apreciar mejor en un producto terminado.

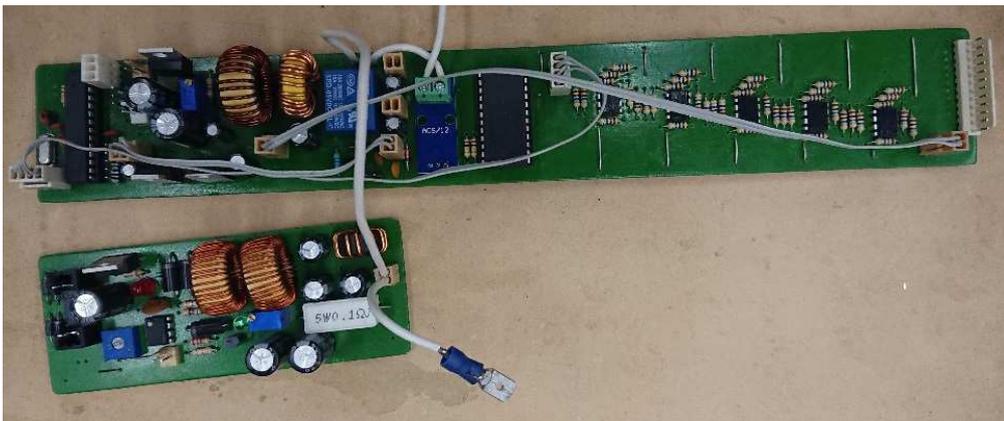


Figura 5.16: PCB con cargador con BMS VF1.

Ya con la tarjeta soldada se prosiguen a realizar los experimentos que validen el funcionamiento del circuito completo (BMS con cargador).

#### 5.4.2.1. Resultados del cargador y del BMS VF1

##### Resultados de los experimentos para el BMS

###### 1. Sensado.

###### a) Circuito de Voltaje.

Al conectar cada una de las baterías a los sensores se observó que el voltaje era estable, y muy similar al de la batería que estaba midiendo con un error de  $\pm 0.05[V]$ .

###### b) Circuito de corriente.

Al activar una carga conocida de corriente sobre el sensor se observó que el circuito funciona con un error de  $\pm 0.1[A]$ , que para este caso es un error pequeño en comparación a la corriente que va a circular a través de el

c) Circuito de Temperatura.

Al conectar el circuito de temperatura e ir variando tanto hacia arriba como hacia abajo la temperatura dentro de los rangos de operación se observó que el sensor proveía una lectura correcta con un error de  $\pm 0.1[^\circ\text{C}]$ .

2. Control de corriente.

Al variar la corriente en los rangos máximos de operación, algunos intermedios así como los mínimos se observó que el circuito cortaba la corriente en el momento en que la corriente excedía los límites colocados en la programación, por lo que el circuito funciona de manera correcta.

3. Regulación de voltaje.

Al conectar el voltaje de entrada de 56 [V] se observó que el circuito soporta la entrada de voltaje, así como también regula de manera estable el voltaje del circuito completo con una carga constante.

4. Ruido.

a) Circuito de Voltaje.

Al accionar el motor, se observa que el voltaje presente en el circuito es mínimo y no afecta a los componentes en su funcionamiento.

b) Circuito de Temperatura.

Con el motor encendido se revisa el valor de la temperatura, observando que no existen cambios debido al ruido.

c) Cerebro o generación de señales.

Al accionar el motor y monitorear el funcionamiento del circuito cerebro que genera las señales de control del BMS, se observó que no se ve afectado por la presencia de la bobina.

d) Circuito de corriente.

Al encender el motor y observar el comportamiento del sensor de corriente, se observó que no se ve afectado por la presencia del ruido y trabaja de acuerdo con lo diseñado

5. Estabilidad.

a) Circuito de Voltaje.

Comparando los dos estados (con motor prendido y motor apagado), se observa que el circuito no presenta cambios.

b) Circuito de corriente.

Al dejar el circuito funcionar por un periodo de 60 minutos, se observó que el circuito no presentó variaciones en su respuesta, por lo que se mantiene estable a lo largo de un periodo de tiempo.

c) Circuito de Temperatura.

Con el motor encendido por 60 minutos, se observó que el circuito no se vio alterado por la presencia de la bobina.

d) Cerebro.

Durante 60 minutos el sistema se mantuvo activo y al llevar un monitoreo de las señales de control del cerebro de este sistema, se observó que registró de manera adecuada los cambios y no se vio afectado por el ruido de la bobina.

6. Calentamiento del circuito de regulación.

Al conectar el circuito de regulación a la carga se observó que aunque soporta el voltaje de entrada, este se ve afectado a lo largo del tiempo por el calor presente en él, lo que lleva a colocarle disipadores de calor a los componentes para evitar que fallen en su operación.

7. Estabilidad del circuito en conjunto.

Esta prueba duró alrededor de 60 minutos, donde se estuvieron monitoreando todos los parámetros, y el comportamiento del sistema en conjunto, esto conllevó a que se observó que el sistema trabajó de manera conjunta, y reaccionando a los cambios existentes en el banco de baterías.

8. Comunicación

a) Estabilidad.

Como este sistema se comunica con el cargador y el controlador, se verificó que con el motor encendido esta no fallara, tanto en la trama que mandaba como en la que recibía, la prueba duró 60 minutos y se observó que fue estable a lo largo de este tiempo.

b) Ruido.

A pesar de estar encendido el motor, la comunicación no se vio afectada por el ruido existente, por lo que permaneció sin problema.

### Resultados de los experimentos para el Cargador

1. Conmutación.

Al revisar el funcionamiento del PWM del cargador con una carga conocida, se observó que el circuito reaccionaba como debía.

2. Rectificado.

El voltaje a la salida es de corriente directa.

### 3. Filtrado

Se redujo el rizo.

### 4. Control.

- a) Al conectar una carga constante menor a dos amperes, el voltaje de salida se mantuvo en 56 [V].
- b) Al conectar el circuito a una carga superior a los dos amperes, se observó que la corriente máxima se mantenía limitada y el voltaje disminuía.

### 5. Calentamiento.

Como el circuito funciona únicamente mientras se realiza la carga del banco de baterías, este debe poder soportar el calentamiento al menos durante la carga completa del banco de baterías, pero como esta es la condición menos deseada, el cargador debe lograr mantenerse en una temperatura estable a lo largo del tiempo, por lo que al conectar la carga máxima permitida en el cargador, se observó que se calentaba durante el uso por lo que es necesario el colocarle disipadores a los elementos, con lo que logrará que el sistema funcione de manera continua dentro de los rangos de operación de los componentes.

### 6. Estabilidad.

Al mantener el circuito en carga constante y tener variaciones de temperatura, el sistema mismo se vuelve inestable, pero al lograr mantener la temperatura dentro del rango de operación de los componentes (empleando un disipador), el sistema se comporta de manera estable a lo largo del tiempo.

## Resultados de los experimentos en conjunto

### 1. Comunicación.

Al mandar información errónea por todos los sensores (prueba realizada sensor a sensor), se verificó que el circuito mientras se realizaba la carga de las baterías, cortara y protegiera el banco, en todos los casos y combinaciones de los sensores, se observó que el circuito activaba la protección.

### 2. Regulación de voltaje.

Al revisar los voltajes de las dos tarjetas, se observa que aunque el sistema funciona bien, se puede mejorar, principalmente en el tamaño y distribución de los componentes.

De los experimentos realizados se puede concluir que el sistema funciona de manera estable, aunque como todo desarrollo aún necesita un mayor análisis en su operación, principalmente porque el BMS es el sistema de protección de las baterías y si este llega a fallar las baterías podrían llegar a dañarse, inutilizando el banco de baterías.

### 5.4.3. Diseño del cargador y del BMS VF2

Ya con la primera versión diseñada y fabricada se pudo concluir que el arreglo de componentes empleado se comporta de la forma deseada, al igual que los sistemas que componen al circuito, pero también se observó que es posible reducir el tamaño del mismo circuito cambiando el arreglo tanto por la ubicación como en la configuración, para esto se realiza una siguiente iteración del diseño, el cual se aborda en esta sección.

Como se ha visto anteriormente, la configuración y los experimentos diseñados para la elaboración de este tipo de tarjetas es esencial para asegurar su funcionamiento, y el tener dividido el circuito, en otros circuitos más pequeños, ayuda a que la tarjeta se puede modificar con facilidad por lo que, para esta versión lo que se decide cambiar es el circuito de alimentación para los componentes, que en este caso estará distribuido a lo largo de la tarjeta y no concentrado en un único lugar.

Esto servirá tanto para disipar el calor, reduciendo el tamaño del disipador y teniendo una mejor distribución de los componentes, este diseño se muestra en la Figura 5.17, dónde al igual que en el caso anterior, fue pensado en cumplir las necesidades presentes.

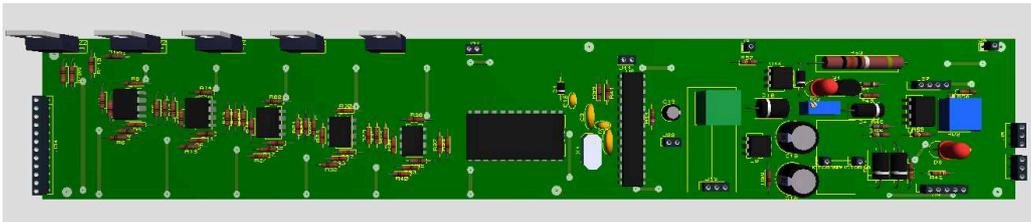


Figura 5.17: Cargador con BMS VF2.

Con estos cambios en el diseño, aunque los experimentos planteados anteriormente son necesarios y es recomendable emplearlos, el experimento principal a realizar es el que involucra el cambio en el diseño.

Estos experimentos son mencionados a continuación:

#### Experimentos para el BMS

##### 1. Regulación de voltaje.

Revisar que el circuito de regulación soporte el voltaje de entrada Máximo (56 [V]), que regule el voltaje a los rangos que se emplearán en toda la tarjeta y verificar estabilidad ante una carga constante.

## 2. Calentamiento del circuito de regulación.

Debido a que el circuito de regulación es el que se encarga de suministrar la energía a la electrónica, este sufre calentamiento debido a la carga que transita sobre él, por lo que es importante verificar que, colocando la carga de operación, el circuito funcione sin un calentamiento excesivo (dentro de los parámetros de los componentes).

### Experimentos en conjunto

#### 1. Regulación de voltaje.

Revisar que los voltajes se mantengan estables al alimentarse los dos circuitos en simultáneo.

### 5.4.4. Manufactura del cargador y del BMS VF2

Ahora con este segundo diseño se prosigue a la manufactura, en la cual se emplea el método de foto transferencia sobre la tarjeta y la infraestructura que ya se tiene elaborada. En la Figura 5.18, se muestra la tarjeta elaborada con los componentes soldados, además de tener en cuenta que en esta tarjeta se realizan los experimentos correspondientes a esta sección, tomando mayor énfasis en los experimentos correspondientes a los cambios realizados.

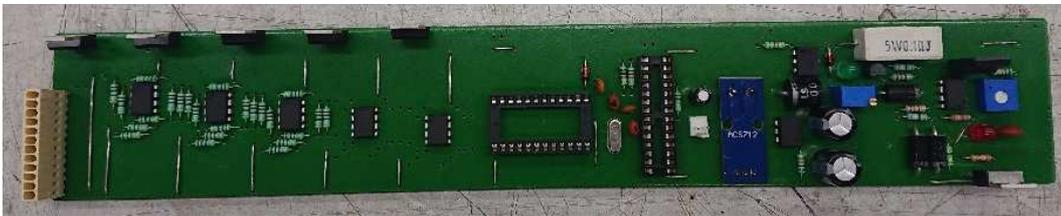


Figura 5.18: PCB con cargador con BMS VF2.

Ya con la tarjeta soldada se prosiguen a realizar los experimentos que validen el funcionamiento del circuito completo, la principal diferencia es que se hará un mayor énfasis en la parte correspondiente a los cambios del diseño (los experimentos mencionados anteriormente), esto debido a que se espera que en las demás secciones del circuito se obtengan respuestas muy similares.

#### 5.4.4.1. Resultados del cargador y del BMS VF2

##### Experimentos para el BMS

Al realizar las pruebas del BMS con la tarjeta correspondiente al cargador se observa que el comportamiento del circuito es prácticamente el mismo, por lo que el circuito hasta ese punto

se encuentra validado, solo faltaría realizar las últimas pruebas que corresponden a los cambios que se realizaron al circuito, estos resultados se muestran a continuación.

1. Regulación de voltaje.

Al conectar el voltaje de entrada de 56 [V] se observó que el circuito soporta la entrada de voltaje, así como también regula de manera estable el voltaje del circuito completo con una carga constante, cumpliendo e igualado al circuito anterior, con la diferencia de tener los componentes en otra distribución.

2. Calentamiento del circuito de regulación.

Al igual que en el caso anterior, al conectar el circuito de regulación se observó que este se calentaba, pero de diferente forma, principalmente porque los componentes que se encargan de suministrar el voltaje a la tarjeta se encuentran separados y en un arreglo diferente, lo que hace que el acomodo de los mismo disipe de mejor forma el calor (aunque aun así es necesario colocar disipadores).

### Experimentos en conjunto

1. Regulación de voltaje

Al revisar los voltajes de las dos tarjetas, se observa que el sistema funciona bien y de una forma mas eficiente en la distribución del calor de los componentes.

Aunque los resultados de los otros experimentos no se mencionan, es importante resaltar que los resultados obtenidos al realizarlos son muy similares si no es que iguales en la mayoría de los casos, ya que la configuración es la misma que en el caso anterior, lo único que se cambia es el diseño del circuito regulador de voltaje, cuyos resultados ya fueron mencionados.

En este punto se tiene el BMS con cargador diseñado, fabricado y validado, por lo que solo hace falta realizar la implementación sobre los vehículos y comprobar su funcionamiento dentro de un vehículo.

## 5.5. Resultados globales, sobre los vehículos

Se ha visto con anterioridad cada uno de los sistemas diseñados y fabricados, como lo son el controlador, el BMS y el cargador, los cuales son objetivos de este trabajo, pero el tenerlos diseñados y probados en el laboratorio no es suficiente para considerar que los sistemas funcionan

correctamente, por lo cual fueron diseñados y construidos algunos vehículos para realizar pruebas más cercanas a la realidad.

En esta sección se tratarán y hablarán de los resultados experimentales obtenidos durante las pruebas realizadas sobre los vehículos, tanto en el prototipo como en el urbano mostrados en el capítulo 3.

Primero que nada se realiza la conexión del controlador del vehículo prototipo, baterías BMS y cargador, esto se muestra en la Figura 5.19, con todo montado se prosigue a realizar la conexión del sistema de telemetría, que aunque no se muestra la tarjeta en este trabajo, es el sistema que se desarrollo para poder evaluar el comportamiento del controlador mientras el vehículo es manejado.



Figura 5.19: Controlador del vehículo prototipo colocado.

Las pruebas realizadas del controlador en el vehículo prototipo fueron hechas en el estacionamiento del Anexo de Ingeniería, principalmente por facilidad, en estas pruebas se realizaron las de manejo, resistencia del controlador y eficiencia que posee el vehículo.

Para esto, el sistema de telemetría provee información como lo es la corriente que consume el controlador con el motor, la corriente que consume el motor y voltaje de baterías a lo largo del tiempo, estos datos se obtienen directamente de las pruebas realizadas, algunas de las gráficas correspondientes a estos resultados se muestran en este trabajo.

Antes de empezar las pruebas sobre los vehículos, se realizan inicialmente unas tablas de características finales de los dos controladores fabricados y del BMS con cargador, estas tablas

se obtienen de los experimentos realizados al inicio de este capítulo, cada una de las tablas corresponden a cada sección (controlador prototipo, controlador urbano, BMS y cargador).

En la Figura 5.20 se muestra la tabla correspondiente al controlador del vehículo prototipo, donde los parámetros importantes a resaltar son el voltaje de entrada de operación que es de 56 [V], la corriente regulada para el motor es de 10 [A] y está pensado para un motor de 1500 [W], con esta información se prosigue a revisar la tabla correspondiente al BMS con cargador, ya que también estará montado en el vehículo (Figura 5.21).

Controlador Prototipo		
Descripción	Valor	Unidad
Voltaje de entrada Máximo	56	[V]
Voltaje de entrada mínimo	45	[V]
Corriente máxima continua	10	[A]
Pico de corriente máxima	100	[A]
Peso	1.25	[kg]
Dimensión	10 x 20 x 15	[cm]
Fases controladas	3	
Número de sensores de entrada	3	
Número de ventiladores	0	
Control de velocidad	Analógica	
Control de velocidad	Incluido	
Potencia soportada Máxima	1,500	[W]
Entrada de botón de dirección	Si	
Entrada de botón de encendido	Si	
Programable	Si	

Figura 5.20: Características del controlador prototipo.

BMS con Cargador		
Descripción	Valor	Unidad
Voltaje de entrada del cargador	127	Volts en CA
Voltaje de salida del cargador	56	Volts en CD
Corriente de salida del cargador	2	[A]
Temperatura máxima del BMS	50	[°C]
Corriente del BMS	10	[A]
Voltaje de celda Máximo	4.2	[V]
Voltaje de celda mínimo	3.5	[V]
Número de celdas medidas	13	
Dimensiones	10 x 30 x 4	[cm]
Programable	Si	
Voltaje de alimentación del BMS Máximo	56	[V]
Comunicación	Si	I2C
Peso	55	[g]

Figura 5.21: Características del BMS con Cargador.

Al igual que en el caso del controlador del prototipo se mencionan los parámetros importantes a tener en cuenta, los cuales son el voltaje de alimentación el cual es de 56 [V], la corriente que limita, que en este caso será de 10 [A], además del voltaje de entrada para realizar la carga de 127 volts de corriente alterna, el BMS se encuentra colocado en las baterías junto al cargador, el cual para diferenciar la conexión y poder conectar con facilidad se colocó una clavija, la cual se observa en la Figura 5.19, donde está todo el sistema montado.

Con esta información se prosigue a realizar la prueba de funcionamiento sobre el vehículo prototipo, anteriormente ya se realizaron pruebas a cada sistema y se validaron, ahora se realizan pruebas sobre pista y así obtener información de la electrónica, conociendo su comportamiento además de obtener los datos necesarios que se utilizarán para la formula Shell, ya que es una competencia de eficiencia y la información adquirida es de vital importancia para mejorar el rendimiento del vehículo.

En las gráficas mostradas en la Figura 5.22, se muestran los resultados de una de las pruebas realizadas a la electrónica del vehículo prototipo, donde la línea azul correspondiente a C1 es la corriente de que consume el motor y el controlador en conjunto, C2 es la corriente que consume únicamente el motor (línea naranja), la línea gris corresponde al voltaje del banco de baterías durante las pruebas en volts, y la línea amarilla es la velocidad a la cual se maneja el vehículo.

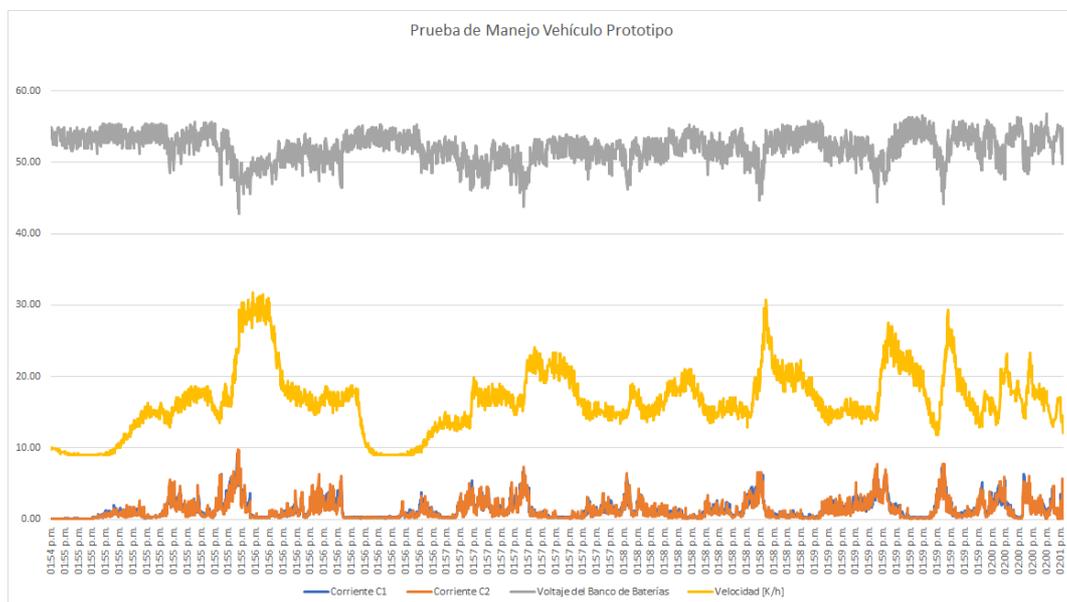


Figura 5.22: Prueba de manejo del vehículo prototipo.

De la gráfica se pueden observar diferente información valiosa para el caso del diseño del controlador y el BMS, se observa que existen momentos en los que el banco de baterías provee

un voltaje variable en algunos casos, punto importante ya que los diseños están pensados para trabajar en 56 [V], y la existencia de esto pueden causar que tanto el controlador como el BMS dejen de funcionar correctamente, pero de la información adquirida se aprecia que el voltaje no es superado por el ruido, entonces los circuitos encargados de regular el voltaje, los cuales son más susceptible a aumentos de voltaje no se ven afectados ya que el voltaje nunca excede los límites de diseño.

Otro punto que se puede observar es la forma en que la corriente se comporta, ya que el BMS está regulando los 10 [A] para proteger las baterías, aunque también se observa que existen picos en los cuales la corriente llega a subir un poco superior a los 10 [A] pero el BMS lo restringe lo suficientemente rápido evitando el daño en las mismas.

También se observa en la gráfica, como el voltaje y la corriente están relacionadas, al tener picos de corriente también se tiene presente cambios en el voltaje, esto se puede deber principalmente a que las dos variables están relacionadas y al exigir una mayor cantidad de corriente, el voltaje de las baterías se ve afectado, si las baterías no se encontraran en buen estado o si no tuviera la suficiente capacidad para mover el vehículo, el voltaje del banco de baterías se bajaría más allá del valor mínimo de operación.

Es importante resaltar que estas gráficas, corresponden a una sección de todo el experimento, donde se quiere mostrar el comportamiento que tiene la corriente, voltaje y velocidad como parámetros en común, ya que en la gráfica que muestra toda la información del experimento, no es posible apreciar esta relación.

Otro punto importante que resaltar es la velocidad a la que se estuvo trabajando, la cual no es muy alta y se debe principalmente a que las pruebas fueron realizadas en el estacionamiento del Anexo de Ingeniería, lo que evitaba que se alcanzaran velocidades superiores a los 35 Km/h, pero las pruebas realizadas dan una buena información del comportamiento del vehículo y de la electrónica en un uso mas cercano a la realidad.

**Con esta información y después de ir realizando diferentes pruebas de manejo, se concluyó que el controlador del vehículo prototipo, así como el BMS y el cargador funcionan como era esperado de las pruebas del laboratorio.**

Ahora con se procede a realizar las pruebas sobre el vehículo urbano, en la Figura 5.23 se muestra el vehículo completo, incluyendo la computadora del mismo, sobre este vehículo se coloca todo el sistema correspondiente al urbano (controlador del vehículo urbano, BMS y cargador), pero previo a la colocación del BMS al banco de baterías, se realiza un cambio importante, el cual es la cantidad de corriente que circula ya que en este auto se empujan dos motores de 1000 [W], por lo que cada motor se espera que consuma 10 [A], de aquí es el hecho de tener disponibles del banco de baterías 20 [A], esto se logra cambiando los valores programados, por lo que la tabla mostrada en la Figura 5.21 cambia en el valor de corriente del BMS de 10 [A] a 20 [A].



Figura 5.23: Vehículo Urbano sobre el cual se realizan las pruebas.

Ahora en la Figura 5.24 se muestra la tabla correspondiente al controlador del vehículo urbano, donde los parámetros importantes a resaltar son el voltaje de entrada de operación que es de 56 [V], la corriente que regula por cada motor es de 10 [A] por lo que en total consume 20 [A], además de que el controlador está pensado para soportar 2000 [W], es decir 1000 [W] por cada motor.

Controlador Urbano		
Descripción	Valor	Unidad
Voltaje de entrada Máximo	56	[V]
Voltaje de entrada mínimo	45	[V]
Corriente máxima continua	10	[A]
Pico de corriente máxima	120	[A]
Peso	1.25	[kg]
Dimensión	21 x 27.5 x 10	[cm]
Fases controladas	6	
Número de sensores de entrada	6	
Número de ventiladores	1	
Control de velocidad	Analógica	
Control de velocidad	Incluido	
Potencia soportada Máxima	2,000	[W]
Entrada de botón de dirección	Si	
Entrada de botón de encendido	Si	
Programable	Si	

Figura 5.24: Características del controlador urbano.

Con esta información se prosigue a realizar la prueba de funcionamiento sobre el vehículo urbano, anteriormente ya se realizaron pruebas a cada uno de los sistemas así como también se validaron,

ahora se realizan pruebas sobre pista y con esto se logra obtener información de la electrónica empleando el sistema de telemetría en el vehículo urbano, pero a diferencia del vehículo prototipo, este vehículo emplea dos motores en su funcionamiento, por lo que en este caso, forma de obtener información se decide que sea para los dos motores, es decir medir la corriente en ellos, con esto dejando para futuros experimentos el consumo de corriente del controlador.

Conociendo el comportamiento de la electrónica en el vehículo urbano, se puede saber que tan eficiente es, principal objetivo de la formula Shell en la cual participará este vehículo, pero para el caso de estudio de este trabajo de tesis, sirve para conocer como es la respuesta del controlador en situaciones reales de manejo.

En este caso se muestran cuatro graficas correspondientes a las pruebas que se realizaron, estas están divididas en pares, ya que como se mencionó, se medirá la corriente en un motor y en dos motores por lo que en este caso, C1 corresponde a la corriente de un motor (grafica azul), la gráfica de color gris corresponde al voltaje del banco de baterías a lo largo de la prueba, mientras que la gráfica amarilla corresponde a la velocidad a la cual se movía el vehículo urbano, estos datos se muestran en las gráficas de la Figura 5.25.

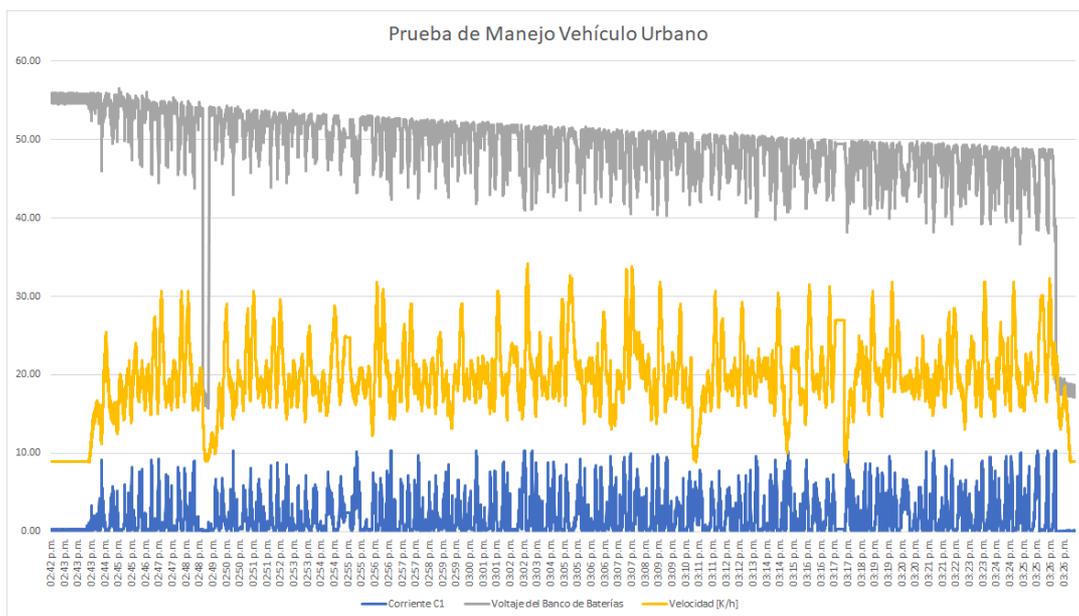


Figura 5.25: Prueba de manejo 1 del vehículo urbano con la corriente de un motor.

Mientras que en las gráficas de la Figura 5.26 se muestra la corriente que consumen los dos motores al trabajar en paralelo, esta información se muestra en la gráfica de color naranja (corriente C2), además se muestra el voltaje del banco de baterías a lo largo de las pruebas (gráfica de color gris) y de color amarillo se muestra la velocidad del vehículo en km/h, estas

ultimas dos graficas mencionadas, son las mismas que en la gráfica anterior, y se colocan para que sirvan de referencia entre las dos corrientes.

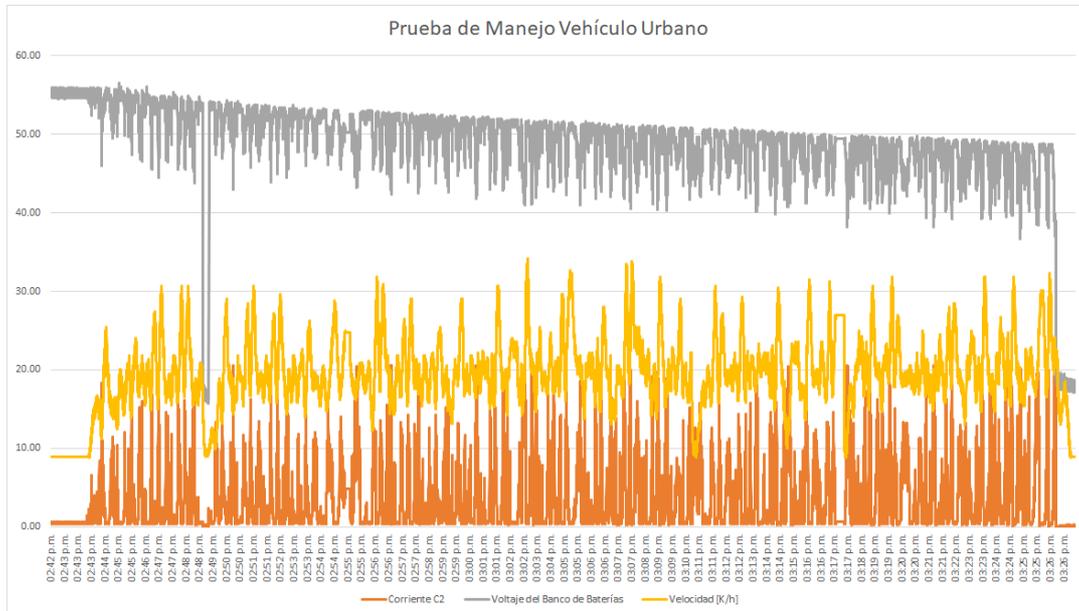


Figura 5.26: Prueba de manejo 1 del vehículo urbano con la corriente de los dos motores.

Además, en las pruebas mostradas en las dos gráficas anteriores se hace un recorrido completo, en el cual el vehículo agota la batería por completo.

En las gráficas al inicio y al final de estas se observan los puntos en los cuales se empieza a realizar las pruebas, ya que cuando el auto no está encendido, la corriente es cero además que el valor de velocidad se muestra con un valor constante.

Un punto importante y a resaltar de estas gráficas se puede observar el comportamiento de la restricción de la corriente, esta corriente se mantiene en valores cercanos a 20 [A] en el caso de la medición de los dos motores, se observa la restricción y como la protección del BMS entra en acción.

Mientras que en la gráfica que muestra la corriente de un motor, se observa que la corriente se mantiene inferior a 10 [A], con picos que en algunos casos supera este valor, pero se encuentra dentro de los rangos esperados.

Igual que en el caso anterior se observa como el voltaje se ve afectado por la corriente que circula por los motores, la cual se ve afectada de la forma de manejo, en los puntos en que se acelera el vehículo, la corriente se aumenta y el voltaje se reduce, lo cual se espera en este tipo de sistemas.

Pero a en estas dos gráficas se muestra la duración total del banco de baterías, además que también se observa el momento en que el sistema dejó de funcionar ya que se ve una caída drástica del voltaje, la corriente y la velocidad en ese punto se mantuvo constante.

De aquí se logra concluir que el sistema de telemetría es lo suficiente mente robusto para analizar la información adquirida de los vehículos y si llega a fallar, es muy evidente el localizar los puntos de fallo.

Con la información adquirida de estas pruebas se puede lograr obtener la eficiencia del controlador y por ende también la eficiencia que tiene el vehículo urbano, pero lo importante en este trabajo de tesis es la demostración de que el controlador del vehículo urbano funciona adecuadamente, así como el BMS y el cargador que, aunque no se tienen gráficas de la carga de batería, se probó para cargar el banco y estar realizando las pruebas de los dos vehículos.

## Capítulo 6

# Trabajo futuro y Conclusiones

Aunque es posible, el reducir la explicación del trabajo a futuro de cada sistema en una única, considero que es más importante dar a conocer de manera individual el trabajo pendiente en cada sistema, por lo que se dará un trabajo a futuro general, así como específico.

### 6.1. Trabajo a futuro del controlador

#### 6.1.1. Vehículo prototipo

El trabajo a realizar en lo que es electrónica es amplio, aunque se tiene un controlador funcional para el vehículo prototipo aún es posible mejorarlo en muchas cosas, que por falta de tiempo y la amplitud de este trabajo no se lograron realizar por lo que como trabajo a realizar quedaría el agregar un frenado regenerativo, reducir el consumo del controlador, el tamaño así como también el mejorar cada una de las tarjetas, probando nuevas configuraciones y evaluando su comportamiento en comparación a lo que se tiene actualmente.

#### 6.1.2. Vehículo urbano

En este caso, aunque el controlador doble que se desarrollo y logró sincronizar para funcionar en conjunto tiene un buen funcionamiento para lo que es la competencia, es posible mejorarlo, primero reduciendo el consumo ya que por falta de tiempo se colocó un ventilador para evitar que fuera a fallar, lo que consume energía de manera innecesaria, además el tamaño se puede mejorar cambiando componentes y arreglos de los mismos.

Otro factor a mejorar es agregar un frenado regenerativo para los dos motores que se tienen y que trabaje de manera sincronizada en la carga de las baterías, otro factor a mejorar es el evaluar otro tipo de componentes ya que únicamente se han empleado Mosfets para estos controladores pero podrían emplearse IGB y comparar el rendimiento de este tipo de electrónica.

Parte de este nuevo trabajo se muestra en los apéndices, para ser más exactos en la Figura 7.5 (sección 7.3), donde se muestra la última versión fabricada del controlador tanto para el vehículo prototipo como para el vehículo urbano, el cual es resultado de la experiencia adquirida en el trabajo realizado.

## **6.2. Trabajo a futuro del BMS con cargador**

### **6.2.1. BMS**

El BMS se logró construir y diseñar en este trabajo aunque funcional, aún puede mejorarse, no solo en el tipo de arreglo que se realizó, si no en el cambio de componentes, ya que actualmente existen componentes que realizan funciones similares a la electrónica que se fabricó, y sería importante el realizar una comparación en cuanto al funcionamiento de un BMS comercial con el BMS fabricado en este trabajo, evaluando consumo, flexibilidad, rangos de operación, robustez como algunos factores, para así conocer en qué punto se encuentra este diseño en comparación a lo que existe en el mercado.

### **6.2.2. Cargador**

Para el cargador se tiene aún mucho trabajo, este cargador es de poca potencia y posee un control muy simple, por lo que sería bueno el implementar algoritmos de carga, además de incrementar la capacidad del mismo en potencia, otro factor a mejorar es el probar nuevas configuraciones con componentes distintos para así lograr evaluar si existen mejores elementos para realizar este tipo de electrónica.

## **6.3. Trabajo a futuro del los vehículos**

Aunque los vehículos no son parte fundamental de este trabajo de tesis, también es importante resaltar que aunque estos fueron construidos para realizar pruebas más exigentes, que fueran parecidas a la realidad, estos vehículos presentados fueron las primeras versiones por lo que, tanto

en su diseño, como manufactura queda mucho trabajo que realizar, reduciendo peso, cambiando algunos elementos así como la realización de un análisis estructural para evaluar los puntos que requieren menor o mayor cantidad de material

Otro factor que impacta en esta área es la infraestructura que se va consiguiendo a lo largo de los años para lograr mejores resultados, así como la capacitación de gente, que sepa emplear las herramientas y maneje los procesos de manufactura a seguir.

En este caso, el diseño y la construcción de nuevos vehículos continúa avanzando, entre estos se lleva a cabo un nuevo vehículo prototipo el cual se muestra en todas las Figuras de la sección 7.1 del capítulo apéndices el cual es nombrado vehículo 3, ahí se muestra el trabajo donde se aplica lo aprendido a lo largo de las versiones anteriores, este vehículo será el nuevo vehículo prototipo que representará al equipo DZEC, además en la sección 7.2 se muestran las modificaciones que se han realizado al vehículo urbano Mictlán, donde el objetivo principal es tener un vehículo de mejores características que el vehículo mostrado en este trabajo, además de que con esta versión se pudieron implementar nuevas ideas y agilizar las pruebas de la electrónica.

## 6.4. Conclusiones

Como primer punto se concluye que se logró diseñar, construir, evaluar en el laboratorio e implementar dos controladores diferentes, uno para un vehículo eléctrico prototipo con un motor de tres fases a 1000 [W], así como para un vehículo eléctrico urbano con dos motores de 1000 [W] cada uno trabajando en paralelo.

De igual forma se logró diseñar, construir, evaluar en el laboratorio e implementar un cargador con BMS integrado para un banco de baterías de litio a 48 [V], dicho banco de baterías fue colocado para alimentar tanto el vehículo prototipo, como el vehículo urbano, por lo que se cumplió este objetivo.

De lo anterior se concluye que el objetivo principal de este trabajo de tesis se logró culminar con éxito, obteniendo información de la electrónica en pruebas cercanas al uso cotidiano, así como también se logró obtener experiencia de estos últimos desarrollos.

De igual forma se puede concluir que las 15 metas planteadas al principio de este trabajo se lograron culminar, agregando la implementación de un cargador trabajando en conjunto con un BMS, los cuales se encuentran en la misma tarjeta, punto que no se colocó al inicio del trabajo, pero al ir desarrollando el mismo, se tomó como la mejor opción de implementación.

El desarrollo de tecnología nunca se detiene, y aunque en este momento estos son los circuitos más avanzados construidos por el autor del trabajo, no significa que sean los mejores, entre más

experiencia y conocimiento tenga la persona que diseña la electrónica, los diseños serán mejores, así como también el avance de nuevos componentes electrónicos, son de los factores que pueden hacer que un sistema de este tipo sea mejor.

Se ha visto a lo largo del trabajo, que se hacen referencias a proyectos anteriores, los cuales aunque no son tal cual el trabajo de tesis, son la base y parte de la experiencia que se ha adquirido a lo largo del tiempo, es la investigación, y el entendimiento que se tiene en este tipo de sistemas lo que permite el desarrollo de un diseño de controlador, BMS y cargador base, del cual pueden surgir diferentes diseños para diferentes necesidades.

De lo anterior expuesto es que sobresale la importancia del desarrollo de tecnología, ya que, con la experiencia adquirida hasta este momento, se puede desarrollar y construir sistemas acordes a las necesidades, además de tener la flexibilidad de modificar los diseños a voluntad para obtener mejores resultados ante un problema específico.

Un punto a tratar cuando se involucra el desarrollo de tecnología, es la experiencia que se tiene al desarrollarla y llevarla a cabo en el mundo real, ya que el realizar un trabajo experimental y controlado, es diferente al realizar un trabajo en el cual se traten de igualar las condiciones de uso cotidiano del sistema, ya que la forma en que se utilizan y los factores externos pueden influir tanto positivamente como negativamente en el diseño realizado, de aquí la importancia de tratar de llevar a cabo la electrónica a casos reales, debido a que se puede obtener mayor cantidad de información de este tipo de pruebas que de una de laboratorio, no solo por el comportamiento del sistema, sino también del usuario final que empleará el equipo.

Complementando el párrafo anterior, también es importante estar pendiente y consciente de cada uno de los eventos que puedan ocurrir en las pruebas realizadas en prototipos reales, ya que si no se conoce perfectamente el sistema, la información de lo ocurrido en fracciones de tiempo (esto debido a que es electrónica y el comportamiento es muy rápido en comparación a la respuesta mecánica del sistema) se puede perder, lo cual por la falta de experiencia o falta de atención puede causar un retraso en la investigación o en la detección de fallas en diseños electrónicos de este tipo.

Se ha visto y mencionado múltiples veces la realización de experimentos, los cuales, aunque no se menciona como se obtuvieron o porque se decidieron realizar, son el resultado de la experimentación, el observar la necesidad que se tiene y la generación de una manera de resolver y ubicar fallas en los circuitos electrónicos diseñados, con lo cual es parte del aporte principal de este trabajo, ya que se condensan los años de experiencia en esas pruebas.

Un factor crucial al experimentar con electrónica de este tipo es el prestar mucha atención a las señales que se observan, al comportamiento de cada arreglo, así como de los componentes, ya que es de esta observación que se logra obtener información valiosa sobre los diseños, y las posibles fallas que este pueda llegar a tener.

El llevar un orden al fabricar, así como al realizar los armados tanto en protoboard como en placa fenólica, facilita mucho el evitar errores, ya sean por la manufactura, un cable mal conectado o que las características de los componentes no cumplan la necesidad, por lo que es muy importante el trabajo limpio cuando se trata de este tipo de electrónica.

Aunque los vehículos mostrados en este trabajo no son el punto principal, tienen gran relevancia en el mismo, principalmente porque son los medios en los cuales se realizaron las pruebas de campo, fueron sistemas diseñados de tal forma que su funcionamiento permitiera observar cómo se comporta la electrónica mientras está en un uso lo más cercano a la realidad, punto al cual los sistemas realizados en muchos trabajos de tesis no llegan, ya sea por tiempo, recursos u otro factor, y en este trabajo de tesis se logró presentar y realizar pruebas experimentales en vehículos que aunque no son de un tamaño real, cumplen muy bien su función.

Como recomendación quedaría el exponer que este tipo de electrónica es compleja, ya que falla fácilmente debido a muchos factores, por lo que llevar calma y paciencia al realizarla es muy importante, así como también el observar y analizar cada uno de los factores que ocurren durante los experimentos, pruebas o en operación cotidiana, en esencia es el entender lo que realiza la electrónica que estás diseñando.

Como conclusión general se puede decir que los objetivos planteados al inicio de este trabajo fueron logrados, ya que se tiene el diseño y resultados experimentales de un controlador, BMS y cargador base para vehículos eléctricos, así como las pruebas realizadas sobre los vehículos, de los cuales se obtuvo información del funcionamiento de la electrónica en pista.

# Capítulo 7

## Apéndices

### 7.1. Vehículo 3

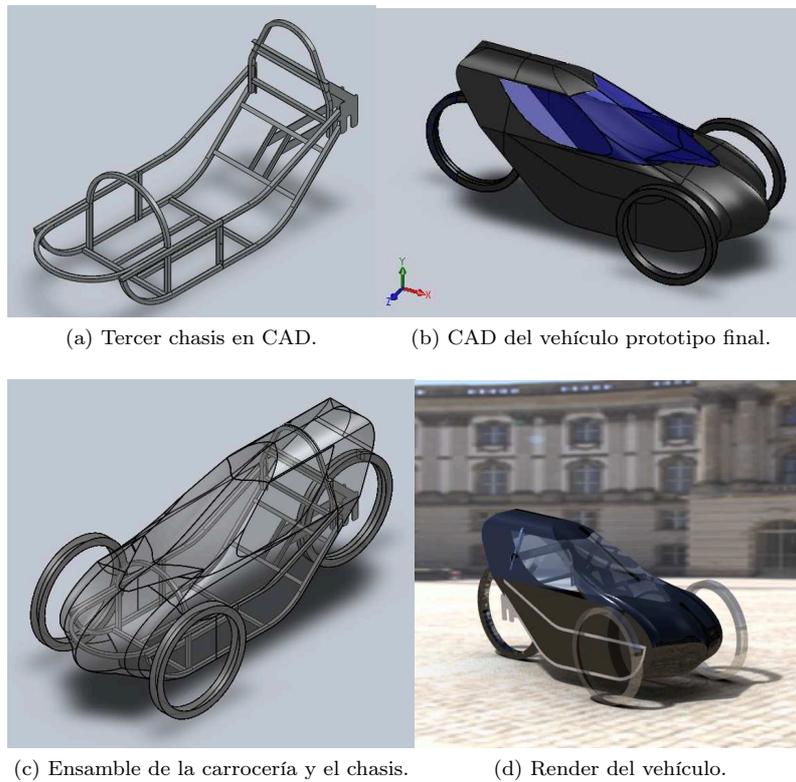


Figura 7.1: Tercer chasis en CAD.



Figura 7.2: Manufactura del chasis final.



(a) Moldes para la carrocería del prototipo armada.

(b) Preparación de moldes para el enfibrado.



(c) Carrocería pintada.

(d) Carrocería del vehículo prototipo terminada.

Figura 7.3: Prototipo final armado.

## 7.2. Vehículo Urbano Modificado



Figura 7.4: Presentación del vehículo ante medios 13/03/2020. [R34], [R35]

### 7.3. Nuevo controlador



Figura 7.5: Nueva versión del controlador para motores brushless de 3 fases.

# Bibliografía

[1] Enrique Gabriel Munive Roldán, (2013) ACTUALIZACIÓN DE UNA MÁQUINA CNC POR CORTE LÁSER, capítulo 3, Tesis para obtener el título de Ingeniero Mecatrónico.

# Referencias

Todas las referencias presentada a continuación fueron revisadas en el año 2019.

[R1] [https:// www. realestatemarket. com. mx /articulos /mercado -inmobiliario /urbanismo /14889- las- ciudades- y- la- movilidad- de- sus- habitantes](https://www.realestatemarket.com.mx/articulos/mercado-inmobiliario/urbanismo/14889-las-ciudades-y-la-movilidad-de-sus-habitantes)

[R2] [https:// www. forbes. com. mx /la -actual -revolucion -de -la -movilidad -en -latam/](https://www.forbes.com.mx/la-actual-revolucion-de-la-movilidad-en-latam/)

[R3] [https:// www. animalpolitico. com /2019 /01 /tres -ciudades -mexico -servicios -adecuados -de -transporte -y -movilidad/](https://www.animalpolitico.com/2019/01/tres-ciudades-mexico-servicios-adecuados-de-transporte-y-movilidad/)

[R4] [https:// motor. elpais. com /actualidad /movilidad -urbana -un -reto -del -siglo -xxi/](https://motor.elpais.com/actualidad/movilidad-urbana-un-reto-del-siglo-xxi/)

[R5] [https:// www. caf. com/ es/ actualidad/ noticias/ 2013/ 08/ que -es -movilidad -urbana/](https://www.caf.com/es/actualidad/noticias/2013/08/que-es-movilidad-urbana/)

[R6] [https:// www. hosteltur. com/ 127870\\_ asi- sera- el- futuro- de- la- movilidad- en- las- ciudades. html](https://www.hosteltur.com/127870_asi-sera-el-futuro-de-la-movilidad-en-las-ciudades.html)

[R7] [https:// www. gq. com. mx/ actualidad/ articulos/ cambio -en -movilidad -grandes -ciudades /13197](https://www.gq.com.mx/actualidad/articulos/cambio-en-movilidad-grandes-ciudades/13197)

[R8] [https:// imco. org. mx/ wp -content /uploads /2019 /01 /I%CC% 81ndice -de -Movilidad -Urbana \\_Documento .pdf](https://imco.org.mx/wp-content/uploads/2019/01/I%CC%81ndice-de-Movilidad-Urbana_Documento.pdf)

[R9] [https:// www. eluniversal. com. mx/ autopistas/ scooters -en -la -cdmx -solucion -o -problema -mayor](https://www.eluniversal.com.mx/autopistas/scooters-en-la-cdmx-solucion-o-problema-mayor)

[R10] [https:// www. kavak. com/ blog/ autos- electricos- disponibles- en- mexico](https://www.kavak.com/blog/autos-electricos-disponibles-en-mexico)

[R11] Stromer. ST2-Technology. Consultado el 15 de mayo de 2017, en [https://www. stromer- bike. com /en/nl/technology /st2-technology](https://www.stromer-bike.com/en/nl/technology/st2-technology).

- [R12] BionX. BionX PL 250 M. Consultado el 15 de mayo de 2017, en <http://www.ride-bionx.com/in/ebike-systems/pl-250-m/#features>. DAPU. DAPU M123 RN. Consultado el 15 de mayo de 2017, en <http://www.dapumotors.com/portfolio/m123-rn/>.
- [R13] KAHLKOFF. KAHLHOFF IMPULSE EVO. Consultado el 28 de abril de 2017, en <http://www.kalkhoff-bikes.com/en/impulse-drive/impulse-evo.html>.
- [R14] BOSCH. BOSCH e-Bike Systeme. Consultado el 25 de abril de 2017, en <https://www.bosch-ebike.com/de/>. YAMAHA. YAMAHA e-bike Systems PW.
- [R15] Consultado el 2 de mayo de 2017, en <https://global.yamaha-motor.com/business/e-bike-systems/pw/>.
- [R16] DAPU. DAPU MD250. Consultado el 3 de mayo de 2017, en <http://www.dapumotors.com/portfolio/md250/>.
- [R17] VIVAX. Vivax Assistant. Consultado el 31 de mayo de 2017, en [http://www.vivax-assist.com/en/product/vivax-assist/vivax-assist\\_4-0.php](http://www.vivax-assist.com/en/product/vivax-assist/vivax-assist_4-0.php).
- [R18] SHIMANO. Shimano Descarrilador trasero. Consultado el 28 de mayo de 2017, en <http://bike.shimano.com.br/content/sla-bike/es/home/mtb/freios-e-cambios/cambios-traseiros.html> y <https://www.amazon.com/Shimano-Acera-RD-410-Mountain-Derailleur/dp/B003UWJW7W>.
- [R19] SHIMANO. Shimano 8-speed cassette. Consultado el 28 de mayo de 2017, en [https://www.amazon.com/Shimano-Speed-Mountain-Cassette-11-34T/dp/B005DTX1VS/ref=pd\\_sim\\_468\\_2?encoding=UTF8&pd\\_rd\\_i=B005DTX1VS&pd\\_rd\\_r=WQ5HG7YCTFC7Y8FDH21H&pd\\_rd\\_w=8fkqx&pd\\_rd\\_wg=Kqxf&psc=1&refRID=WQ5HG7YCTFC7Y8FDH21H](https://www.amazon.com/Shimano-Speed-Mountain-Cassette-11-34T/dp/B005DTX1VS/ref=pd_sim_468_2?encoding=UTF8&pd_rd_i=B005DTX1VS&pd_rd_r=WQ5HG7YCTFC7Y8FDH21H&pd_rd_w=8fkqx&pd_rd_wg=Kqxf&psc=1&refRID=WQ5HG7YCTFC7Y8FDH21H).
- [R20] <https://www.solter.com/es/como-escoger-cargador-baterias>
- [R21] [https://imco.org.mx/wp-content/uploads/2019/01/I%CC%81ndice-de-movilidad-urbana\\_documento.pdf](https://imco.org.mx/wp-content/uploads/2019/01/I%CC%81ndice-de-movilidad-urbana_documento.pdf)
- [R22] <http://spanish.cylindricallithiumbattery.com/sale-8610398-panasonic-18650-3-6-v-battery-lithium-rechargeable-batteries-3100mah.html>
- [R23] <https://www.electrobicis.com/>
- [R24] <https://www.todomountainbike.net/componentes/motores-mas-ligeros-baterias-mas-capacidad-nuevo-bosch-bicis-electricas>
- [R25] <https://planoinformativo.com/674113/scooters-en-la-cdmx-solucion-o-problema-mayorg->

- [R26] [https:// www.ecured. cu/Bater % C3%ADa\\_ \(acumulador \\_el%C3%A9ctrico\)](https://www.ecured.cu/Bater%C3%ADa_(acumulador_el%C3%A9ctrico))
- [R27] [https:// architecnologia. blogspot. com/ 2014/ 04/ baterias -de-ion -litio -conceptos .html](https://architecnologia.blogspot.com/2014/04/baterias-de-ion-litio-conceptos.html)
- [R28] [https:// www. recargacocheselectricos. com/ category/ articulos- tecnicos- movilidad- elec- trica /page/5/](https://www.recargacocheselectricos.com/category/articulos-tecnicos-movilidad-electrica/page/5/)
- [R29] [http:// electronics. howstuffworks. com/ everyday- tech/ lithium- ion- battery1. htm](http://electronics.howstuffworks.com/everyday-tech/lithium-ion-battery1.htm)
- [R30] [https:// www. marketresearch. com/ product/ sample- 8323376. pdf](https://www.marketresearch.com/product/sample-8323376.pdf)
- [R31] [https:// diccionario. motorgiga. com /diccionario /cargador- de- bateria- definicion- sig- nificado/ gmx- niv15- con193423. htm](https://diccionario.motorgiga.com/diccionario/cargador-de-bateria-definicion-significado/gmx-niv15-con193423.htm)
- [R32] [https:// conceptodefinicion. de/ motor/](https://conceptodefinicion.de/motor/)
- [R33] [https:// bombasdeaguavenezuela. blogspot. com/ 2013/ 04/ bombas- de- agua- variadores- de- frecuencia\\_ 1014. html](https://bombasdeaguavenezuela.blogspot.com/2013/04/bombas-de-agua-variadores-de-frecuencia_1014.html)
- [R34] [https:// www. gaceta. unam. mx/ mictlan- auto- electrico- hecho- en- la- unam/](https://www.gaceta.unam.mx/mictlan-auto-electrico-hecho-en-la-unam/)
- [R35] [https:// www. dgcs. unam. mx/ boletin/ bdboletin/ 2020\\_ 227 .html](https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2020_227.html)