

Diseño e implementación del sistema de propulsión para un prototipo primitivo de vehículo
eléctrico para la E3T-UIS

Daniel Eduardo Lizarazo Rosas y José David Angarita Pertuz

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Electricista e Ingeniero Electrónico

Director

Ricardo Alzate Castaño

Ph.D. en Ingeniería Informática y Automática

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

A mi madre Elizabeth, a Jairo, y a toda mi familia,
por siempre apoyarme, creer en mí, y ser un modelo a seguir.

A Yeniffer,
por estar junto a mí a lo largo de este proyecto, animándome a seguir adelante.

Daniel Eduardo Lizarazo Rosas

Dedicado principalmente a Dios quien me dio las fuerzas suficientes para seguir cuando en ciertos momentos de mi carrera quise dejar todo atrás, quien proveyó a mis familia para que no me faltara nada en estos años de carrera. Agradezco a mis padres que siempre creyeron en mí y dieron su mayor esfuerzo para que mi sueño de ser ingeniero se cumpliera, agradezco a mi Nona que a pesar de la distancia siempre estuvo apoyándome y deseando lo mejor para mí.

A cada miembro de mi familia que estuvo para ayudarme muchas gracias, a mis amigos de la Universidad con los que disfrutaba pasar tiempo y contar uno que otro chiste, a mis amigos del box donde el ejercicio se volvió terapia y conocí grandes personas, a mis amigas de la iglesia de san francisco que fueron un soporte cuando a veces nada tenía sentido, a mi amiga del colegio que siempre me hizo ver lo lejos que habíamos llegado a pesar de tener las cosas en contra, a mi compañero de tesis que fue la idea inicial del proyecto.

José David Angarita Pertuz

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander y al vicerrector administrativo Gerardo Latorre, por su apoyo en la realización de este proyecto.

Al profesor Ricardo Alzate, Por su dirección y acompañamiento.

Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Objetivos	16
1.1 Objetivo General	16
1.2 Objetivos específicos	16
2. Diseño del prototipo de vehículo eléctrico	16
2.1 Etapas principales del sistema	17
2.1.1 Carrocería.....	18
2.1.2 Motor eléctrico.....	19
2.1.3 Variador de frecuencia.....	26
2.1.4 Inversor de potencia.....	28
2.1.5 Batería.....	31
2.1.6 Acople de tracción mecánica	34
2.2 Adecuaciones mecánicas	36
2.3 Adecuaciones eléctricas	41
2.4 Adecuaciones electrónicas	42
2.5 Prototipo final implementado	49
3. Análisis experimental.....	51
3.1 Pruebas de componentes individuales	52
3.2 Pruebas mecánicas en vacío.....	55

3.3 Pruebas tripuladas en campo.....	57
4. Conclusiones	62
5. Recomendaciones	64
5.1 Trabajo futuro	64
Referencias Bibliográficas	66

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Partes principales de un EV.....	12
Figura 2. Diagrama de bloques funcional para el prototipo de vehículo.....	18
Figura 3. Ilustración para carrocería de un vehículo.....	19
Figura 4. Chasis VTH adquirido para el trabajo de grado.....	21
Figura 5. Modelo tridimensional con medidas.....	22
Figura 6. Motor de inducción seleccionado.....	27
Figura 7. VFD seleccionado.....	29
Figura 8. Inversor de potencia seleccionado.....	31
Figura 9. Cuadro resumen para principales tipos de batería.....	32
Figura 10. Batería y cargador de batería seleccionados.....	34
Figura 11. Acople de engranajes por cadena.....	35
Figura 12. Acople real implementado en el vehículo.....	36
Figura 13. Rueda neumática seleccionada.....	37
Figura 14. Rodamientos empleados en adecuaciones.....	38
Figura 15. Modelo tridimensional para ubicación de equipos en vehículo modificado: 1) batería, 2) inversor, 3) VFD, 4) motor, 5) mando electrónico, 6) acople de tracción mecánica y 7) carrocería.....	39
Figura 16. Identidad visual para prototipo de vehículo eléctrico.....	40

Figura 17. Esquema de conexiones eléctricas del prototipo: diagrama de mando (derecha) y potencia (izquierda)	42
Figura 18. Diagrama esquemático para tarjeta electrónica diseñada	45
Figura 19. Diseño de tarjeta de mando electrónico.....	46
Figura 20. Maquina de estados de operación para mando electrónico del vehículo.....	47
Figura 21. Prototipo de vehículo eléctrico E3carT	50
Figura 22. Comportamiento de variables eléctricas durante carga de batería	53
Figura 23. Ilustración para pruebas de componentes individuales	54
Figura 24. Magnitudes eléctricas para prueba mecánica en vacío.....	56
Figura 25. Sensor de efecto Hall utilizado para medir ω_2	57
Figura 26. Ilustración para pruebas mecánicas en vacío.....	58
Figura 27. Ilustración pruebas tripuladas en cancha municipal de Piedecuesta	59
Figura 28. Magnitudes eléctricas en VFD para prueba tripulada en campo	60
Figura 29. Comportamiento de voltaje durante prueba de descarga en batería	61

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Características técnicas de motor.....	26
Tabla 2. Características técnicas de VFD	28
Tabla 3. Características técnicas del inversor de potencia.....	30
Tabla 4. Características técnicas de batería	33
Tabla 5. Costos involucrados en la realización del proyecto.....	49

Resumen

Título: Diseño e implementación del sistema de propulsión para un prototipo primitivo de vehículo eléctrico para la E3T-UIS*

Autores: Daniel Eduardo Lizarazo Rosas y José David Angarita Pertuz**

Palabras Clave: Electrificación del tren de potencia, movilidad eléctrica, prototipo de vehículo eléctrico, validación experimental.

Descripción:

El presente trabajo de grado aborda el acondicionamiento mecánico y la electrificación para el tren de potencia de un vehículo de tracción humana, a manera de prototipo funcional de vehículo eléctrico. Inicialmente, se aplicaron conceptos de física fundamental para dimensionar la carga mecánica equivalente del chasis tripulado y a partir de ello se dimensionaron los requerimientos de potencia para vencer las fuerzas inerciales y facilitar su movimiento. Posteriormente, se procedió con la elección y compra de dispositivos comerciales para la electrificación del tren de potencia incluyendo: una batería de plomo-acido, un circuito inversor de potencia monofásico, un variador de frecuencia trifásico y un motor de inducción trifásico satisfaciendo los requerimientos de potencia mecánica calculados. La interconexión apropiada de dichos dispositivos eléctricos se complementó por la valoración y ejecución de todas las posibles modificaciones y adecuaciones mecánicas sobre la estructura original para ajustarse a los requerimientos de un vehículo eléctrico. Finalmente, pruebas experimentales en campo incluyendo valoración de dispositivos individuales, operación en vacío y operación tripulada, permitieron verificar el apropiado desempeño de las componentes mecánicas y eléctricas del prototipo acopladas como conjunto en el proyecto denominado: E3carT. Trabajo futuro incluye la optimización energética del prototipo y su evolución hacia una conducción autónoma a través del seguimiento de trayectorias preprogramadas.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.
Director: Ricardo Alzate Castaño, Doctorado en Ingeniería Informática y Automática.

Abstract

Title: Design and implementation of the propulsion system for a primitive prototype of electrical vehicle at the E3T-UIS3*

Autores: Daniel Eduardo Lizarazo Rosas y José David Angarita Pertuz**

Keywords: Electric transportation, electric-vehicle prototype, experimental validation, powertrain electrification.

Description:

In this work the mechanical conditioning and electrification of the powertrain for a human-powered vehicle is addressed as part of its transformation into a functional prototype of electrical vehicle. First of all, fundamental concepts of physics were applied to determine the equivalent mechanical load of the chassis for the single-seat manned car under study in order to quantify power requirements assuring a continuous motion of the vehicle. Then, sizing and selection for commercial devices required to perform the electrification of the vehicle's powertrain were performed, including: a lead-acid battery, a single-phase power inverter, a variable-frequency drive and a three-phase induction motor satisfying power requirements to overcome inertial forces according to calculations. The appropriate interconnection of the aforementioned electrical devices was complemented by the implementation of mechanical adjustments required to better adapt the original structure (chassis) to the new features of the electrical powertrain. Finally, a set of experimental tests including assessment for individual devices and unmanned/manned operation of the vehicle, were performed to verify the performance of the combined electrical and mechanical parts of the system in the so-called: E3carT project. Ongoing work includes optimization of the power consumption for the prototype and steps towards the autonomous operation of the vehicle by following pre-set pathways in automatic pilot mode.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Ricardo Alzate Castaño, Doctorado en Ingeniería Informática y Automática.

Introducción

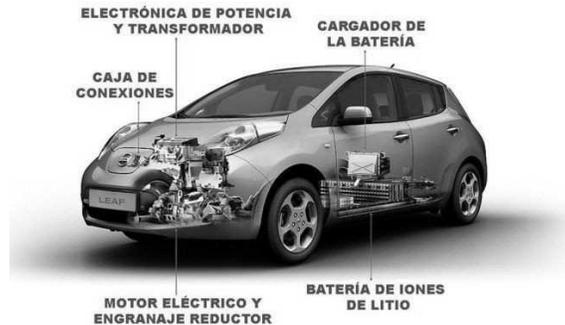
La “descarbonización” de la economía ha impulsado a gobiernos de todo el mundo a proponer incentivos para acelerar la transición de combustibles fósiles a energías de tipo renovable. En particular, un gran esfuerzo económico y tecnológico se viene realizando en años recientes para aplicar lo anterior a los medios de transporte, incluyendo excepciones tributarias de importación y circulación, subsidios para compra, fabricación o investigación y beneficios logísticos como vías exclusivas, espacios de parqueo especial y descuentos de tarifas, entre otros.

Un vehículo eléctrico (EV *electric vehicle* de su sigla en inglés) es un vehículo automóvil, para transporte de personas o de mercancías, propulsado por uno o más motores eléctricos, usando energía eléctrica almacenada normalmente en baterías recargables. La Fig. 1.1 ilustra el esquema general para un EV.

En el año 2010 el gobierno de China puso en marcha un proyecto piloto de incentivos en la compra de autos eléctricos e híbridos, complementado en 2012 por una exención de impuestos anuales. A partir de ello, se experimentó un crecimiento en ventas para este tipo de vehículos en un 328 % para el año 2014. No obstante, para reducir las emisiones contaminantes al ambiente se deben complementar estas medidas con cambios en la canasta energética de un país que produce el 75 % de su electricidad a partir de carbón (Masiero, Ogasavara, Conde, & Risso, 2016).

Figura 1.

Partes principales de un EV



Nota. Tomado de Wikipedia Enciclopedia Libre (s.f.) Recuperado de: Wikipedia.org

Por su parte, Alemania propuso en 2010 la meta de tener circulando un millón de EV para 2020, a partir de subsidios en investigaciones para nuevas tecnologías y exenciones tributarias anuales de circulación hasta por diez años. Sin embargo, a noviembre de 2014 solo se había logrado el 25 % de dicha meta, hecho que motivó un incremento de incentivos para grandes compañías productoras como Nissan, BMW y Citroën (Loisel, Pasaoglu, & Thiel, 2014). A pesar de lo anterior, Alemania sigue siendo el país inventor y promotor del motor de combustión interna y de la tecnología Diésel.

De otro lado, en los Estados Unidos de América se plantearon una meta similar en 2011 para tener un millón de EV circulando al año 2015. Sin embargo, en el año 2016 tan solo el 50 % de esa meta había sido alcanzada, implicando extender las políticas de incentivos y exenciones para la fabricación y comercialización de partes de EV, cuya venta fue levemente incrementada tras integrarse al paradigma de la red inteligente de distribución energética (*SmartGrid*) (Soltani-Sobh, Heaslip, Stevanovic, Bosworth, & Radivojevic, 2017).

A nivel latinoamericano, se cuenta con un alto potencial de recursos naturales para la fabricación de baterías y conductores eléctricos. Chile ha realizado inversiones importantes en transporte público eléctrico. México posee plantas de producción que se han fijado la meta para 2020 de comenzar a producir EV. Perú ha eliminado las tasas de importación de EV y comienza a diseñar su plan de movilidad eléctrica. Paraguay y Brasil cuentan con una amplia cantidad de estaciones instaladas para carga rápida de EV. Argentina, a pesar de tener una riqueza significativa en litio, no presenta mayores avances en una política de movilidad eléctrica debido a los problemas actuales que afronta su economía (Quiros-Tortos, Victor-Gallardo, & Ochoa, 2019).

Por su parte, Colombia en el año 2018 fue el primer país de la región en superar los 1000 EV en circulación, aprobando incentivos fiscales para su compra e importación. Asimismo, aprobó una política nacional de crecimiento verde con la cual se espera tener 600.000 EV (entre vehículos livianos, taxis, buses, vehículos gubernamentales y camiones) para 2030. También es evidente el aumento de motocicletas eléctricas circulantes, con más de 2000 unidades registradas entre 2011 y 2018. Varias empresas prestadoras de servicio eléctrico han instalado estaciones de carga rápida para clientes y usuarios. Desde 2017, las ciudades de Bogotá, Cali y Medellín han estado probando buses eléctricos en sus flotas de transporte masivo y han anunciado planes para introducir taxis eléctricos, algunos en operación desde 2012 (Republica de Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; Ministerio de Minas y Energía; Ministerio de Transporte; Unidad de Planeación Minero Energética UPME, 2019). Todo lo anterior esta articulado con la Ley 1964 del 11 junio de 2019 a partir de la cual la Presidencia de la Republica promueve el uso de EV en Colombia (Gobierno de Colombia, 2019).

En la Universidad Industrial de Santander, en el año de 2010 se desarrolló un concurso de vehículos de tracción humana (VTH) liderado por la Escuela de Ingeniería Mecánica. También se

destaca el trabajo desarrollado por *Ovalle et al.* (Coronado, Navarrete, & Ovalle, 2015) quienes realizaron el diseño y la construcción de un prototipo de vehículo biplaza tipo *Buggy* impulsado a través de un motor de combustión interna. Otro aporte interesante fue realizado por *Cuesta y Callejas* (Cuesta & Callejas, 2019) quienes agregaron propulsión eléctrica (motorización) a un vagón para aplicaciones de minería. Por su parte, *Castro y Peña* desarrollaron un prototipo de transporte unipersonal tipo *Segway* (Castro & Peña, 2011). De manera más reciente, *Amaya y Rueda* (Amaya & Rueda, 2019) realizaron el modelado de una bicicleta eléctrica utilizando la aproximación energética macroscópica. Otros trabajos como el de *Ardila y Ochoa* (Ardila & Ochoa, 2018) se orientan al análisis de estaciones de recarga para vehículos eléctricos, como eventual perturbación del sistema interconectado nacional.

En otras Universidades de Colombia la movilidad eléctrica presenta como su caso más representativo el proyecto *EOLO* desarrollado desde 2015 por la Universidad Minuto de Dios (Ariza & Ramos, 2019). Adicionalmente, en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas se realizó el diseño y fabricación de un vehículo impulsado por energía solar (Carreño, Vacca, & Lugo, 2012) y en la Universidad Militar Nueva Granada se analizó un caso similar al anterior, pero con almacenamiento energético (Arévalo, Ortiz, Gama, Ramos, & Duque, 2014).

Otros desarrollos importantes incluyen el proyecto independiente *ECO-City* que construye EV para comercialización en Colombia (<http://www.eco-citi.com/auto-eléctrico/>) y los monoplaza eléctricos elaborados por los aprendices del Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA). A nivel latinoamericano, se destaca la contribución del Instituto Politécnico Nacional de México (Ramos & Soto, 2013) y en Ecuador el trabajo de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca (Ramos & Soto, 2013). Finalmente, la Universidad Politécnica de Cataluña en España también ha realizado

aportes en el tema de diseño de prototipos de EV tal y como se presenta en (Martin & Mocholi, 2016).

A partir de lo anterior es claro que existen antecedentes de trabajos orientados al desarrollo de vehículos en la Universidad Industrial de Santander, aunque no precisamente para el caso de prototipos de EV tripulados. De otro lado, a nivel colombiano se reportan pocos casos de éxito en desarrollo de EV, con aportes a nivel de simulaciones y prototipos no tripulados, hecho que contrasta con resultados reportados en otras Universidades del mundo.

El presente trabajo de grado propone entonces abordar el diseño y la construcción de un prototipo primitivo (simple) de EV para la E3T-UIS, focalizando el esfuerzo en electrificar la motorización de un vehículo preexistente con tracción humana, permitiendo plantear las siguientes inquietudes: ¿Que adecuaciones deben realizarse en un vehículo de tracción humana para transformarlo en un EV?, ¿Cómo calcular los parámetros de carga de un motor eléctrico encargado de movilizar la estructura del EV?, ¿Cómo dimensionar los elementos básicos del sistema eléctrico de un EV?, ¿Cómo configurar experimentalmente los elementos del sistema eléctrico de un EV?, ¿Qué tipo de pruebas deberán desarrollarse para verificar la apropiada operación del EV?

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Electrificar la motorización de un prototipo primitivo de vehículo para potencial estudio de movilidad eléctrica en la E3T-UIS

1.2 Objetivos específicos

- Diseñar la conversión de tracción humana a tracción eléctrica en un vehículo unipersonal preexistente en la E3T-UIS;
- Determinar las dimensiones físicas y eléctricas de los elementos que constituyen el sistema de tracción eléctrica del vehículo modificado;
- Implementar las adecuaciones de tracción diseñadas y valorar su operación experimental como vehículo eléctrico a partir del desarrollo de un protocolo de pruebas.

2. Diseño del prototipo de vehículo eléctrico

Para construir el prototipo de vehículo eléctrico se requiere definir en primera instancia una parte muy importante que abarca todas las posibles consideraciones ergonómicas, mecánicas

y dinámicas del vehículo; es decir, su *carrocería*. Posteriormente, deberá acoplarse un sistema de propulsión eléctrica ajustado a las condiciones de carga mecánica del prototipo para facilitar su movimiento y gobernar su conducción mediante comandos de tipo electrónico.

El presente *Capítulo* aborda los anteriores conceptos a partir del dimensionamiento de los elementos requeridos para la construcción del vehículo y su respectivo ensamble y configuración experimental.

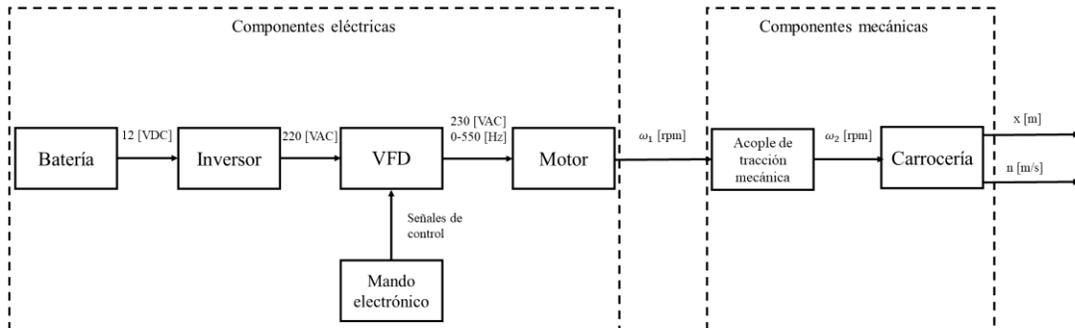
2.1 Etapas principales del sistema

La Fig. 2.1 ilustra el diagrama de bloques para las etapas más importantes del prototipo de vehículo eléctrico a ser implementando. Como se observa, dichas etapas se dividen en partes mecánicas y eléctricas.

A continuación, se abordará la explicación detallada para cada una de ellas, en orden cronológico de aparición durante el proceso de diseño y ensamble del vehículo, describiendo todas sus características técnicas y aspectos operativos.

Figura 2.

Diagrama de bloques funcional para el prototipo de vehículo



2.1.1 Carrocería

Esta parte del sistema corresponde con un armazón metálico que soporta el peso del tren de potencia y el conductor del vehículo. La Fig. 2.2 muestra una carrocería típica, cuyas variaciones a nivel comercial incluyen (entre otras) las de tipo: *sedan*, *hatchback* y *station wagon* (Cascajosa, 2005). Evidentemente, diseñar una carrocería requiere el dominio de conocimientos más allá de la base conceptual de un ingeniero electricista o electrónico, y, por tanto, se estableció contacto con profesores de la Escuela de Ingeniería Mecánica (EIM) de la Universidad Industrial de Santander (UIS) para acceder a diseños de prototipos para competencias (del tipo *VTH*) o adecuar el chasis de vehículos a gasolina preexistentes. Sin embargo, ninguna de dichas opciones se consideró viable dados los costos de inversión y adecuación en comparación con el presupuesto disponible.

Como alternativa, se adquirió (por parte de uno de los autores del trabajo de grado) un chasis *VTH* de segunda mano con la apariencia original mostrada en la Fig. 2.3. En adelante, se denominará *chasis* a la parte interna de una carrocería.

Entre las características principales del chasis adquirido se tienen: un peso de 20 [kg] aproximadamente, una estructura construida en aluminio, frenado por fricción mecánica y un timón acondicionado a un mecanismo de dirección por palancas. Detalles de la geometría del vehículo y sus dimensiones se presentan en el sólido tridimensional ilustrado en la Fig. 2.4, construido a partir de la herramienta Blender (www.blender.org).

Figura 3.

Ilustración para carrocería de un vehículo



2.1.2 Motor eléctrico

El corazón del *tren de potencia* corresponde con el *motor eléctrico*. Para dimensionarlo, es necesario calcular la potencia de la carga mecánica a vencer para producir el movimiento del vehículo.

Lo anterior se realizó siguiendo las indicaciones de *Ricardo Alfonso Jaimes Rolon* (Profesor adscrito a la EIM-UIS) y las *Secciones 2.2/2.3* de (Ehsani, Gao, Longo, & Ebrahimi, 2018) ante las siguientes consideraciones:

- Operación sobre una superficie plana; es decir, lisa, con buen agarre y pendiente cercana a 0° ;
- Velocidad máxima v_{cm} de 30 [km/h] \equiv 8.33 [m/s], como restricción dada por la Ley 1239 de 2008 para circulación en zonas escolares y residenciales como la UIS;
- Tiempo de aceleración t_a de 30 [s] desde el reposo, para reducir corrientes de arranque y requerimientos de potencia en el motor;
- Masa total del vehículo m_c de 220 [kg] distribuida en: 20 [kg] del chasis, 80 [kg] del pasajero y 120 [kg] del tren de potencia;

Figura 4.

Chasis VTH adquirido para el trabajo de grado

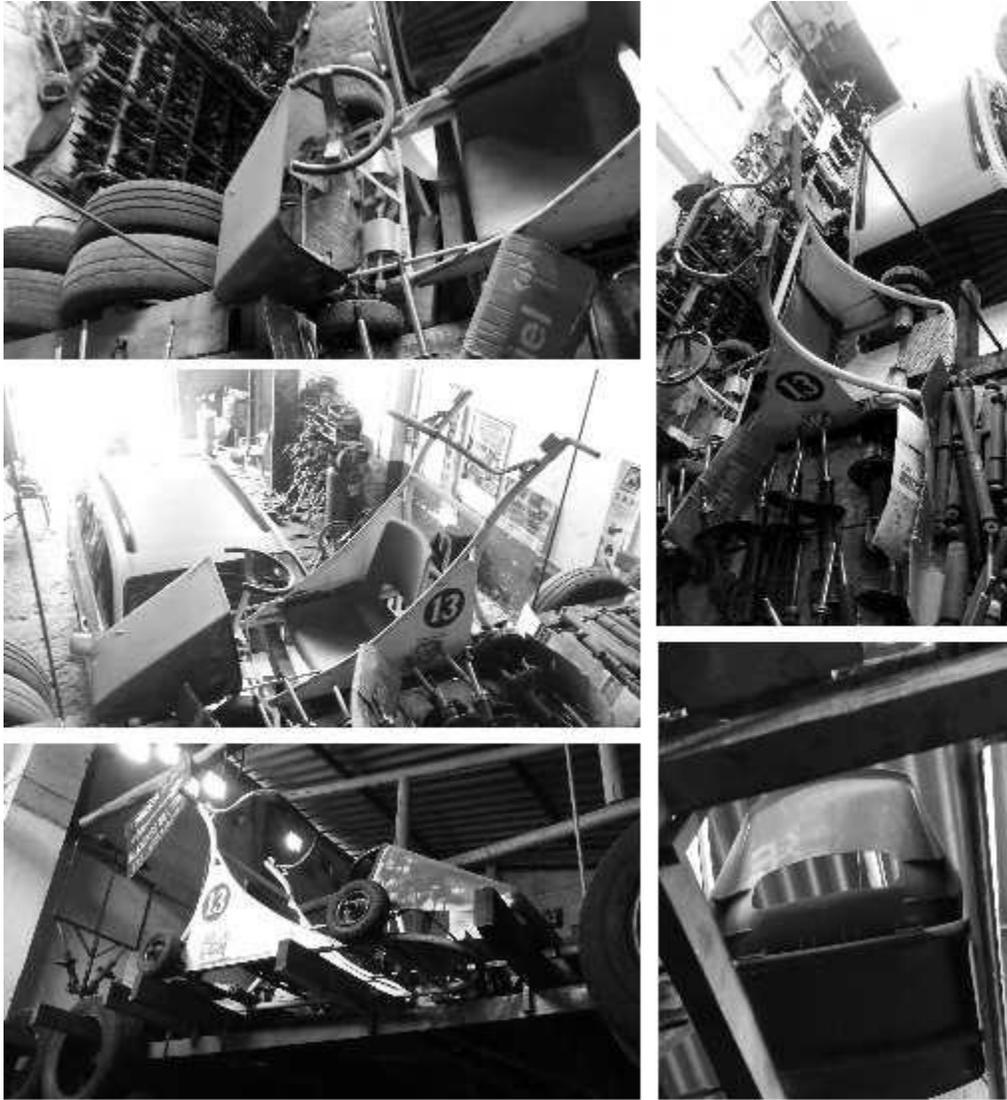
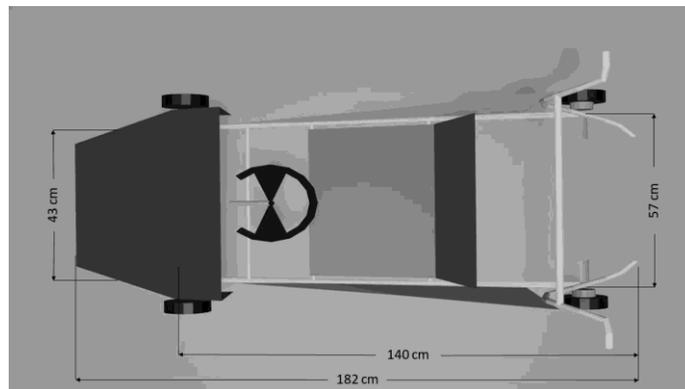
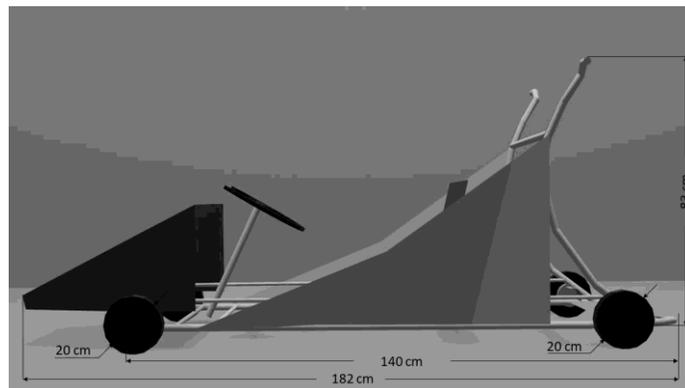


Figura 5.*Modelo tridimensional con medidas*

(a) Vista superior



(b) Vista lateral derecha

- Llantas neumáticas para uso en carretillas (momento de inercia I_r calculado asumiendo forma en anillo), con datos promedio dados por: masa m_r de 3.5 [kg], radio externo r_e de 0.2 [m] e interno r_i de 0.1 [m];

- A rea transversal A expuesta al viento de valor 1.0032 [m²] (calculada con la forma de un trapecio) para una velocidad v_v de 1.3889 [m/s] \equiv 5 [km/h] promedio del viento en Bucaramanga (según www.windfinder.com). Este valor es bajo comparado con la velocidad del sonido, lo cual simplifica los análisis y cálculos matemáticos.

A partir de ello, inicialmente se determina la potencia P_l requerida por el motor para vencer la inercia lineal del vehículo y llevarlo desde el reposo hasta la máxima velocidad en el tiempo especificado:

$$\begin{aligned} P_l &= F_l \times v_{cm} \\ &= 509[W] \end{aligned}$$

siendo F_l la fuerza requerida, definida a su vez como:

$$\begin{aligned} F_l &= m_c \times \left(\frac{v_{cm}}{t_a} \right) \\ &= 220 \times \left(\frac{8.33}{30} \right) \\ &= 220 \times 0.2777 \\ &= 61.1[N] \end{aligned}$$

De otro lado, la potencia P_r requerida por el motor para vencer la inercia rotacional del vehículo y llevarlo desde el reposo hasta la máxima velocidad en el tiempo especificado, puede calcularse como:

$$\begin{aligned} P_r &= \tau_r \left(\frac{v_{cm}}{r_e} \right) \\ &= 20.24[W] \end{aligned}$$

siendo τ_r el torque requerido, definido a su vez como:

$$\begin{aligned} &\tau_r \times I_r \times \left(\frac{v_{cm}}{r_e} \right) \\ &= 4 \times \left(\frac{m_r}{2} \times (r_i^2 + r_e^2) \right) \times \left(\frac{v_{cm}}{r_e} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 4 \times \left(\frac{3.5}{2} \times ((0.1)^2 + (0.2)^2) \right) \times \left(\frac{8.33}{30} \right) \\
 &= 0.486 [Nm]
 \end{aligned}$$

Adicionalmente, se deben considerar potencias de pérdida por rodadura P_p (i.e. fricción por contacto con el suelo) y por arrastre del viento P_a . Para el primer caso se tiene:

$$\begin{aligned}
 P_p &= 4 \times F_p \times v_{cm} \\
 &= 395.27 [W]
 \end{aligned}$$

siendo F_p la fuerza de oposición ejercida en el punto de contacto, definida a su vez como:

$$\begin{aligned}
 F_p &= c_p \times m_c \times g \\
 &= 0.0055 \times 220 \times 9.8 \\
 &= 11.86 [N]
 \end{aligned}$$

para un coeficiente de rodadura c_p seleccionado con valor típico para llantas BMX empleadas en vehículos solares (Mohd Fakharuzi, y otros, 2015). A su vez, para el arrastre aerodinámico es posible escribir:

$$\begin{aligned}
 P_a &= F_a \times (v_v + v_{cm}) \\
 &= 431 [W]
 \end{aligned}$$

siendo F_a la fuerza de oposición ejercida por el viento, definida a su vez como (Ehsani, Gao, Longo, & Ebrahimi, 2018):

$$\begin{aligned}
 F_a &= \frac{\rho}{2} \times c_a \times A \times (v_v + v_{cm})^2 \\
 &= \frac{1.16}{2} \times 0.81 \times 1.0032 \times (1.3889 + 8.33)^2 \\
 &\approx 44 [N]
 \end{aligned}$$

para un c_d representando un coeficiente de arrastre, tomado de: <http://aerodyn.org/Drag/tables.html> para el caso de un vehículo de competencias. Asimismo, ρ es el valor para la densidad del aire en $[\text{kg}/\text{m}^3]$ a presión atmosférica y $30 [^\circ\text{C}]$.

Finalmente, la potencia requerida por el motor corresponde con:

$$\begin{aligned} P_T &= P_l + P_r + P_p + P_a \\ &= 509 + 20.24 + 395.27 + 431 \\ &= 1355.51[W] \equiv 1.82 [HP] \approx 1491.4[W] \equiv 2[HP] \end{aligned}$$

aproximando a valores comerciales.

Ahora bien, a nivel comercial es posible adquirir motores eléctricos de 2 [HP] con diferentes características constructivas. Por tanto, para abaratar costos de compra y reducir mantenimientos del dispositivo, se optó por un motor de inducción trifásico del tipo jaula de ardilla. A su vez, estos pueden construirse para diferentes características de su relación *par-velocidad* según varias categorías (NEMA A, B, C o D) dependiendo de su aplicación.

Particularmente, para el caso de un vehículo eléctrico se requiere una máquina que facilite un alto torque en el momento del arranque, siendo el NEMA tipo C la opción mas recomendada. Sin embargo, por restricciones presupuestales y de disponibilidad comercial se seleccionó un motor SIEMENS NEMA tipo B de referencia 1LE0141-0EB46-4AA4-Z D80+ con las características técnicas mostradas en la Tabla 2.1 y la apariencia física ilustrada en la Fig. 2.5.

Una vez seleccionado el motor eléctrico, es posible proceder con la determinación de los elementos encargados de suministrar para el mismo la potencia eléctrica de alimentación y la capacidad de manejo para sus condiciones operativas.

2.1.3 Variador de frecuencia

Un variador de frecuencia o VFD (*Variable-Frequency Drive*) es un dispositivo encargado de modificar las condiciones de alimentación de un motor de inducción para alterar su operación. En particular, un VFD mantiene constante el par de la maquina en un rango de velocidades de interés ajustando valores de voltaje y frecuencia de alimentación con relación (V/f) constante. Esto último se conoce comúnmente como *control escalar*.

Tabla 1.

Características técnicas de motor

Parámetro	Valor
Potencia nominal	2 [HP]
Velocidad nominal	1720 [rpm]
Torque nominal	8.3 [Nm] Frecuencia de operación 60 [Hz]
Tensión nominal	220 $\Delta\Delta$ / 380 $\lambda\lambda$ / 440 Δ [VAC]
Corriente nominal	5.8 $\Delta\Delta$ / 3.35 $\lambda\lambda$ / 2.9 Δ [A]
Corriente de arranque	6 [Ia/In]
Torque de arranque	2.6 [Ta/Tn]
Factor de potencia	0.81 [%]
Eficiencia	Alta (IE2)

Figura 6.

Motor de inducción seleccionado



El primer dato a considerar para elegir el variador es la potencia y el tipo de alimentación del motor; es decir: 2 [HP], 220 [VAC] trifásico. Estas deben ser las características de salida del VFD.

Asimismo, la mayor parte de los VFD comerciales ofrecen la posibilidad de realizar un frenado electrónico. Entre las modalidades disponibles se pueden mencionar: frenados tipo rampa con parámetros ajustables, por desconexión de alimentación (también denominado *coast*) y dinámico mediante una resistencia externa. Estas opciones de frenado electrónico se complementan con el frenado mecánico disponible en el chasis del vehículo, para garantizar la seguridad del conductor y de las personas en su entorno.

Adicionalmente, tomando en cuenta la aplicación particular considerada para el VFD, se requiere que este posea la característica de mando remoto para activar sus funciones operativas desde la comodidad de un panel localizado en el volante del vehículo.

De esta manera, dentro de las opciones comerciales disponibles en el mercado que satisfacen los requerimientos anteriores se eligió el variador SIEMENS *Sinamics V20*, con características técnicas resumidas en la Tabla 2.2.

La conexión y configuración de operación (en modo local y remoto) para el dispositivo, serán abordadas con detalle en *Secciones* posteriores del presente documento.

2.1.4 Inversor de potencia

Un circuito inversor de potencia es un transformador electrónico que entrega en su salida potencia eléctrica en corriente alterna ante una entrada de potencia eléctrica en corriente continua. Los inversores son circuitos altamente eficientes que pueden alcanzar rendimientos cercanos al 100 % ante ciertas condiciones.

Tabla 2.

Características técnicas de VFD

Parámetro	Valor
Fases de entrada	1
Tensión de red	200 ... 240 [V] -15 % +10 %
Frecuencia de red	47 ... 63 [Hz]
Fases de salida	3
Tensión de carga	230 [V]
Potencia nominal	1.50 [kW] / 2 [HP]
Corriente nominal	7.8 [A]
Factor de potencia	0.72
Rendimiento	0.98
Entradas digitales	4

Parámetro	Valor
Salidas digitales	2
Entradas analógicas	2
Salidas analógicas	1
Comunicaciones	USS / Modbus RTU
Opciones de frenado	por resistencia / por rampa / por desconexión
Comando local	a través de panel BOP (<i>basic operator panel</i>) integrado
Comando remoto	a través de entradas digitales

Figura 7.

VFD seleccionado



A nivel circuital, un inversor está constituido por arreglos de transistores que operan en modo de conmutación, configurados a partir de diferentes topologías como las de *medio puente*, *puente completo* o *flyback*, y que a su vez pueden ser de tipo *monofásico* o *trifásico* (Rashid, 2001). El objetivo del presente trabajo de grado no es abordar en profundidad ese tema específico, ni mucho menos proponer el diseño de un circuito inversor de potencia y por tanto, la descripción se limitara a justificar la elección de un dispositivo comercial que resuelva las necesidades

particulares para este elemento dentro del esquema general para el vehículo eléctrico definido previamente en la Fig. 2.1.

Más aun, el VFD ya posee como parte importante de su estructura interna un circuito inversor de potencia. Sin embargo, el inversor referido en la presente *Sección* corresponde con la interfaz de alimentación entre la fuente principal del sistema y el conjunto VFD + *motor*.

Lo anterior impone las siguientes restricciones: 1) la tensión de salida del inversor debe ser compatible con la tensión de entrada del VFD, 2) la potencia del inversor debe ser al menos la del motor, 3) la entrada del inversor debe ser compatible con los niveles de tensión en corriente continua disponibles comercialmente para baterías en los niveles de potencia de trabajo del sistema.

De esta manera, se seleccionó un inversor comercial de marca genérica con características técnicas mostradas en la Tabla 2.3 y apariencia física mostrada en la Fig. 2.7.

Tabla 3.

Características técnicas del inversor de potencia

Parámetro	Valor
Potencia continua	2000 [W]
Potencia pico	4000 [W]
Tensión de salida	220 [VAC]
Frecuencia de salida	50 [Hz]
Tensión de entrada	12 [VDC]
Tipo de onda	Senoidal pura
Puertos de salida	1 monofásico

Figura 8.

Inversor de potencia seleccionado

**2.1.5 Batería**

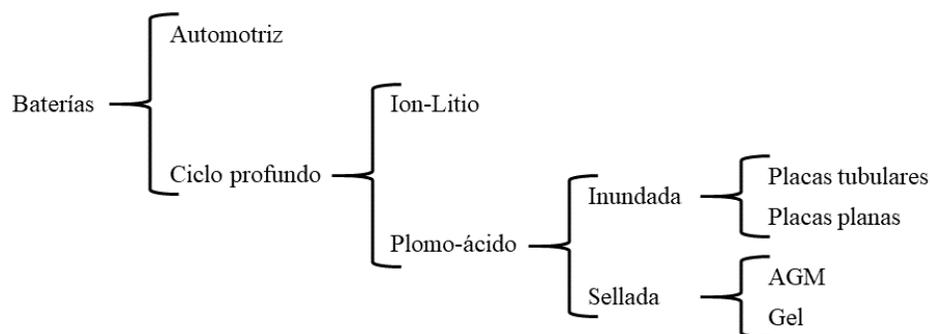
La fuente de energía primaria en vehículos eléctricos varía dependiendo de la gama tecnológica y el fabricante. Lo anterior implica que los bancos de baterías no son la única manera de suministrar la potencia requerida por esta clase de vehículos, aunque quizás sean todavía la alternativa más popular. Otras opciones incluyen las celdas de combustible y en menor proporción los volantes de inercia, estos últimos principalmente para un almacenamiento residual de la energía. Ideas más osadas pueden incluir vehículos eléctricos con celdas solares o miniturbinas y túneles de viento para capturar energía durante su movimiento (Ariza & Ramos, 2019).

Ahora bien, el prototipo a ser implementado utilizará la opción más viable desde el punto de vista técnico y económico: *baterías*. No obstante, realizar la elección de una batería para un vehículo eléctrico implica tener una noción (al menos básica) de las diferentes gamas y tipos que existen comercialmente para este tipo de producto, evitando así realizar una mala inversión que redunde en el funcionamiento inapropiado de todo el sistema.

Al respecto, la Fig. 2.8 presenta un cuadro sinóptico que resume a grandes rasgos los tipos principales de baterías eléctricas actuales. De ellos, se destaca la de uso *automotriz*, que para este caso no sería recomendable debido a que son construidas para proporcionar potencia solo en el proceso de ignición de vehículos a gasolina. En contraste, las baterías de *ciclo profundo* son propicias para trabajo prolongado. Estas a su vez se pueden encontrar en versiones de *Plomo-ácido* y *Ion-Litio*, de las cuales la segunda posee desempeño superior pero también es mucho más costosa. Por su parte en las *Plomo-acido* pueden distinguirse dos subcategorías: las *inundadas* (de placas tubulares o planas) y las *selladas* (en AGM o Gel). La desventaja de las *inundadas* radica en su constante necesidad de mantenimiento, incluso requiriendo agregar agua destilada. Por su parte en el caso de las *selladas* la tecnología *Gel* suele degradarse cuando se expone a altas temperaturas.

Figura 9.

Cuadro resumen para principales tipos de batería



Por tanto, los argumentos anteriores permiten concluir que una batería de *ciclo profundo*, *Plomo-acido*, *sellada* y del tipo *AGM* (separador de vidrio absorbente) representa la opción

tecnológica más adecuada a ser implementada como fuente primaria principal del prototipo de vehículo eléctrico.

De esta manera siendo la potencia del motor 2 [HP] \approx 1500 [W] y tomando en cuenta las restricciones en la tensión de corriente continua a la entrada del inversor de potencia, la corriente proporcionada por la batería (ante un escenario de elementos ideales y máxima carga) deberá ser:

$$\frac{1500[W]}{12 [V DC]} = 125 [A]$$

Comercialmente, fue posible adquirir una batería NETION de ciclo profundo AGM de 12 [VDC] / 150 [Ah] con características adicionales mostradas en la Tabla 2.4 y apariencia física según la Fig. 2.9(a). A partir de ello, se aspira satisfacer la operación del sistema en un rango de máxima carga por un tiempo prolongado (de al menos 30 minutos). Adicionalmente, se adquirió un cargador de baterías genérico con apariencia similar a la mostrada en la Fig. 2.9(b) que supone un tiempo total de carga de 6 horas.

Tabla 4.

Características técnicas de batería

Parámetro	Valor
Resistencia interna a carga completa	3.5 [mΩ]
Máxima pendiente de descarga	1200 [A] / 5 [s]
Corriente de carga máxima	45 [A]
Autodescarga (25 °C, 12 meses)	35 %
Dimensiones (Largo x Ancho x Alto)	485 x 172 x 240 [mm]
Peso aproximado	45.5 [kg]

Figura 10.

Batería y cargador de batería seleccionados



(a) Batería



(b) Cargador

2.1.6 Acople de tracción mecánica

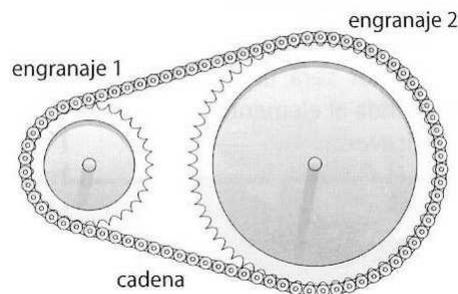
Para transferir la potencia mecánica del motor eléctrico a la carga mecánica representada por las partes del vehículo eléctrico, se realizó un acople mecánico.

Inicialmente, respetando el diseño original del chasis del vehículo se conservó la tracción en las ruedas traseras. A partir de ello, se analizaron diferentes opciones para ejecutar la interconexión entre el eje del motor eléctrico y el eje de las ruedas, siendo quizás la más apropiada

una caja reductora de engranajes cónicos que permitiese, además de un acople sin pérdidas, ubicar el motor en posición ortogonal al eje de rotación de las ruedas para mejorar el aprovechamiento de espacio. Sin embargo, al momento de cotizar este tipo de acople se encontró que superaba notablemente las expectativas de presupuesto del proyecto y por tanto, se propuso una solución alternativa y más económica, correspondiente con dos ruedas dentadas (engranajes) y un acople a través de cadena como el ilustrado en la Fig. 2.10.

Figura 11.

Acople de engranajes por cadena



Para realizar el dimensionamiento de los engranajes, se consideró la relación de transformación N a máxima velocidad:

$$\begin{aligned}
 N &= \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{v_{cm} [rpm]}{1720 [rpm]} \\
 &= \frac{\left(\frac{8.33 [m/s]}{2 \times \pi \times r_e [m/rev]} \times \frac{60 [s]}{1 [min]} \right)}{1720 [rpm]} \\
 &= \frac{\left(6.6288 [rev/s] \times \frac{60 [s]}{1 [min]} \right)}{1720 [rpm]}
 \end{aligned}$$

$$= \frac{397.73 [rpm]}{1720 [rpm]} = 0.23 \approx \frac{1}{5}$$

ante una operación de motor a velocidad nominal.

A partir de ello, se acudió a un taller de metalmecánica para construir dos ruedas de acero inoxidable, una con 9 dientes (equivalentes a 2 [cm] de radio) acoplada al eje del motor y otra con 45 dientes (equivalentes a 10 [cm] de radio) acoplada al eje de las ruedas. Asimismo, se empleó una cadena de acero de 95 [cm] de largo para una distancia efectiva entre ejes de 30 [cm] aproximadamente. El montaje final para el acople de tracción mecánica se visualiza en la Fig. 2.11.

Figura 12.

Acople real implementado en el vehículo



2.2 Adecuaciones mecánicas

El chasis adquirido para el desarrollo del proyecto (previamente mostrado en las Figs. y 2.4) fue construido con un propósito diferente al de un vehículo eléctrico, y por tanto, fue necesario acondicionar dicha estructura de base para tener un mejor desempeño desde el punto de vista

mecánico (motriz) y ergonómico. Así, adicional al acople de tracción mecánica explicado en la Sección anterior, se definieron y ejecutaron las siguientes adecuaciones:

Utilizar un nuevo conjunto de ruedas que soporte el peso del chasis, el pasajero y de todos los dispositivos eléctricos a ser agregados. Para ello se incluyeron 4 ruedas neumáticas de 40 [cm] de diámetro y con capacidad de soportar hasta 150 [kg] cada una. La Fig. 2.12 ilustra la apariencia física de las ruedas utilizadas;

Figura 13.

Rueda neumática seleccionada



a) *Realizar el acople de las ruedas con los ejes delantero y trasero del vehículo. En particular, las ruedas empleadas poseen un acople tipo macho y debido a esto fue necesario acondicionar un rodamiento mediante chumaceras (balineras troqueladas de 5/8") para facilitar el movimiento de cada eje. Para el caso de las ruedas delanteras, un extremo de la chumacera fue soldado al acople mientras el otro fue asegurado por tornillos al mecanismo de giro (dirección), permitiendo un movimiento libre e independiente de cada eje delantero (izquierdo y derecho). Por su parte, las ruedas traseras fueron conectadas a través de un tornillo al vástago del eje en el punto de acople. Posteriormente, dicho vástago fue acoplado a la cara interna de dos chumaceras equidistantes a lo largo de su longitud, con el extremo externo de las chumaceras asegurado por tornillos al chasis del vehículo. De esta manera se obtuvo un rodamiento sin fricción ni vibraciones*

al momento de aplicarse tracción mecánica por parte de los engranajes. La Fig. 2.13 ilustra la apariencia física de los rodamientos utilizados; una lamina de aluminio (lisa) de 2.5 [mm] de espesor y 5200 [cm²] de área aproximadamente (un trapecio con bases de 54.5 [cm] y 40.5 [cm], y altura 110 [cm]);

Figura 14.

Rodamientos empleados en adecuaciones



b) *Utilizar una placa rígida en la base del vehículo para soportar el peso de los elementos eléctricos seleccionados en el tren de potencia.* Para este propósito se empleo

c) *Modificar las proporciones de espacio del pasajero al interior de la cabina.* En este caso se realizaron tres modificaciones principales: i) incrementar la altura del asiento (34 [cm] desde su posición original), ii) mover el asiento hacia atrás hasta el máximo tope permitido por la estructura (travesaño trasero) y iii) ajustar la altura del volante a la nueva altura del asiento de manera tal que existieran 20 [cm] de espacio entre ellos para facilitar la movilidad de las piernas del conductor;

d) *Incrementar el ángulo de maniobra de giro para las ruedas delanteras.* Los ajustes descritos previamente para el acople de las ruedas delanteras al mecanismo de giro (dirección), permitieron obtener una distancia de alrededor 10 [cm] entre el chasis del vehículo y los ejes de

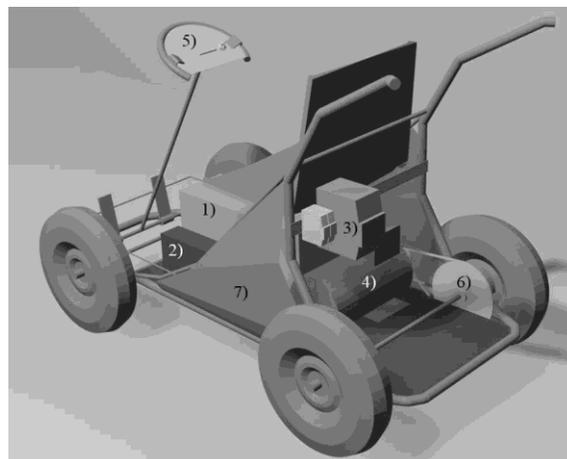
las ruedas, facilitando realizar maniobras de giro con ángulo suficiente (de hasta 30°) durante la conducción. Este aspecto es relevante, pues al momento de seleccionar un nuevo conjunto de ruedas no había garantía que las mismas se ajustaran apropiadamente al diseño original del vehículo;

e) *Realizar limpieza y pintura del chasis modificado.* Para ello se empleó pintura electrostática de color verde 6018, que identifica a la Universidad Industrial de Santander;

f) *Distribuir los elementos eléctricos del tren de potencia en la geometría del vehículo modificado.* Sobre la base del modelo tridimensional presentado en la Fig. 2.14, se realizó la distribución espacial para los elementos principales del tren de potencia que representan las componentes eléctricas del diagrama de bloques definido en la Fig. 2.1 para el prototipo de vehículo. La distribución del espacio se realizó siguiendo el sentido común y tratando de combinar aspectos de confort y seguridad para el pasajero;

Figura 15.

Modelo tridimensional para ubicación de equipos en vehículo modificado: 1) batería, 2) inversor, 3) VFD, 4) motor, 5) mando electrónico, 6) acople de tracción mecánica y 7) carrocería



g) *Fijación de elementos eléctricos del tren de potencia al chasis del vehículo modificado.*

Para asegurar la batería a la estructura se utilizaron perfiles de aluminio en forma de L (o chapetas) de 1/4" de grosor, ajustados al perímetro de la forma rectangular y asegurados a la lámina de base mediante remaches. Una solución similar fue empleada para el inversor de potencia. Por su parte el motor fue fijado a la lámina de base empleando tornillos con tuerca de 1/2" a través de perforaciones alargadas para ajustar la tensión mecánica de la cadena. Finalmente, el variador de velocidad fue atornillado a una placa de aluminio fijada con remaches a un riel omega, a su vez fijado con remaches al travesaño trasero del vehículo;

h) *Diseño de identidad visual.* Se agregaron logotipos de identidad visual al prototipo de vehículo eléctrico, empleando diseños preexistentes que identifican a la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Adicionalmente, se construyó un logotipo especial para el proyecto denominado por los autores: E3carT. Dichos logotipos se ilustran en la Fig. 2.15 y fueron adheridos al vehículo a manera de calcomanías.

Figura 16.

Identidad visual para prototipo de vehículo eléctrico



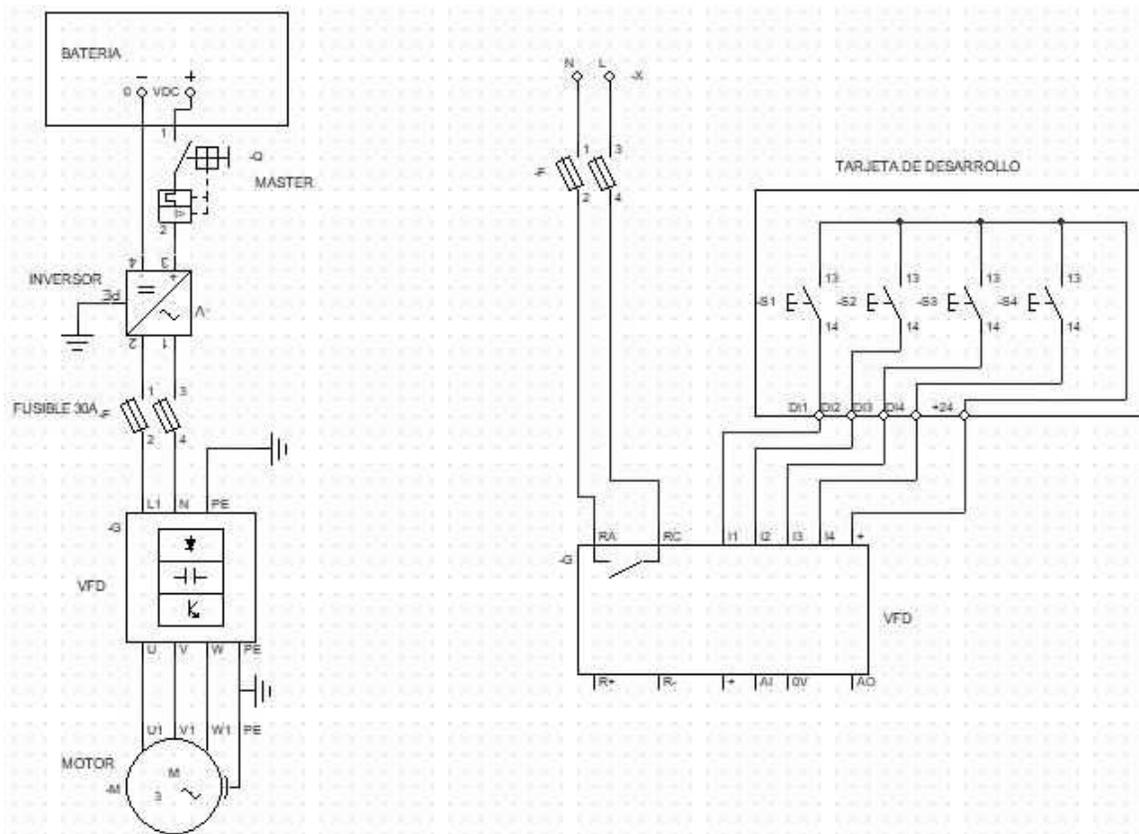
2.3 Adecuaciones eléctricas

La Fig. 2.16 muestra la interconexión realizada entre los elementos que constituyen las *componentes eléctricas* del tren de potencia. Dicho diagrama (construido a manera de esquemas de mando y potencia) muestra además de las conexiones, a todos los elementos de accionamiento y protección utilizados.

De ellos, se destaca el interruptor denominado MASTER que tiene como función desenergizar la alimentación de todos los dispositivos a partir de la desconexión de la batería. Asimismo, se resalta la inclusión de fusibles de 600 [V] / 30 [A] en las líneas de conexión entre el inversor de potencia y el VFD, para proteger los dispositivos ante una sobrecarga. Adicionalmente, se observa la inclusión de una TARJETA DE DESARROLLO para realizar el control de operación del sistema según se explicará con detalle en la siguiente *Sección*.

Figura 17.

Esquema de conexiones eléctricas del prototipo: diagrama de mando (derecha) y potencia (izquierda)



Por último, es conveniente aclarar que la conexión a tierra de las componentes eléctricas del prototipo se realizó mediante la fijación al chasis de las terminales de tierra monofásica en la salida del inversor y trifásica en la salida del VFD.

2.4 Adecuaciones electrónicas

Hasta el momento, se ha abordado con detalle el dimensionamiento de las componentes eléctricas y su acople con las componentes mecánicas del prototipo de vehículo eléctrico. Sin

embargo, aún no se ha discutido la manera de operar el tren de potencia. Por tanto, a partir del diagrama de bloques de la Fig. 2.1 y de la descripción técnica para el VFD realizada en la *Subsección 2.1.3*, es claro que dicho dispositivo constituye la unidad de mando para operación del motor eléctrico y por ende del tren de potencia del vehículo. En particular, es posible operar el VFD en modo local a través de la interfaz de usuario (panel *BOP basic operator panel*) o en modo remoto haciendo uso de sus puertos de entrada analógicos y digitales.

En cualquier caso, la operación del VFD (y por consiguiente del motor eléctrico) se realiza posterior a la configuración de los datos de placa del motor, mismos que fueron asignados a través del *BOP* en el modo siguiente: tensión nominal $P\ 0304 = 220$ [V], corriente nominal $P\ 0305 = 5.8$ [A], potencia nominal $P\ 0307 = 1.5$ [kW], factor de potencia $P\ 0308 = 0.81$, frecuencia nominal $P\ 0310 = 60$ [Hz] y velocidad nominal $P\ 0311 = 1720$ [rpm]. Adicionalmente, se configuro una frecuencia de alimentación para el VFD de 50 [Hz] ($P\ 0100 = 0$).

A partir de ello, se procedió a diseñar y construir una tarjeta electrónica para realizar la operación remota del VFD (correspondiente con la TARJETA DE DESARROLLO indicada en el *esquema de mando* de la Fig. 2.16) atendiendo a los siguientes requerimientos:

- 1) Como elementos de entrada se requieren botones para realizar las maniobras de *avance* y *retroceso*, respectivamente;
- 2) Se requiere un botón adicional para ejecutar la maniobra de *frenado eléctrico*;
- 3) Se requiere un medio para detectar la activación del *frenado mecánico* por parte del sistema electrónico, ejecutando la maniobra de desconexión del tren de potencia eléctrico. Para ello, se ubicó un sensor del tipo *FSR (force sensitive resistor)* acoplado mecánicamente al pedal del freno. De esta manera, la presión mecánica ejercida por el pedal sobre el dispositivo crea una

diferencia de potencial eléctrico en sus terminales constituyendo una señal analógica con niveles de voltaje detectables;

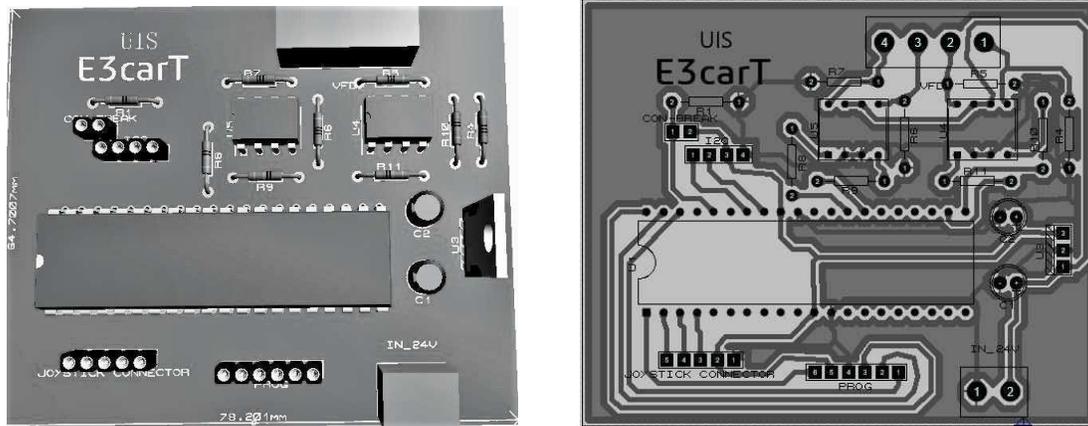
4) Se requiere un indicador para conocer la condición de operación del vehículo a partir de la elección realizada por el usuario en el *mando electrónico*. Para este propósito se empleó una pantalla de cristal líquido (*LCD*) de 16 caracteres y 2 líneas;

5) Se desea que el sistema electrónico sea de *configuración flexible* para adecuarse a futuros requerimientos y funcionalidades adicionales. Tomando en cuenta lo anterior, se utilizó el microcontrolador PIC 18F4550 como unidad de gestión de información;

6) Para *confort* del usuario la unidad de *mando electrónico* deberá ubicarse en un lugar estratégico dentro del vehículo. De esta manera, se decidió localizarla al interior del volante.

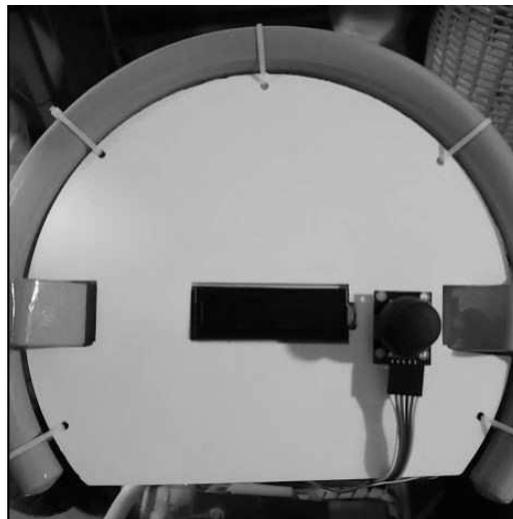
El diagrama esquemático para el circuito electrónico diseñado (incluyendo los elementos mencionados) se presenta en la Fig. 2.17. A partir de ello, se destaca el acople entre las salidas digitales del microcontrolador y las entradas digitales del VFD a través de optoacopladores (para elevar los niveles de señal de 5 [VDC] a 24 [VDC]), la conversión paralelo a serie entre la pantalla LCD y el microcontrolador a través de un convertidor I2C de referencia PCF8574 (reduciendo el tamaño del enrutado en la tarjeta) y la regulación del suministro de 24 [VDC] (provenientes del VFD) a 5 [VDC] para alimentar los elementos del circuito, en su mayoría de tecnología TTL.

Asimismo, la Fig. 2.18 presenta el diseño de la capa de componentes y de ruteado circuital para el montaje del circuito impreso (i.e. *PCB*), al igual que la apariencia final de la tarjeta de mando electrónico incorporada en el volante del vehículo.

Figura 19.*Diseño de tarjeta de mando electrónico*

(a) Capa de componentes

(b) Capa de ruteado

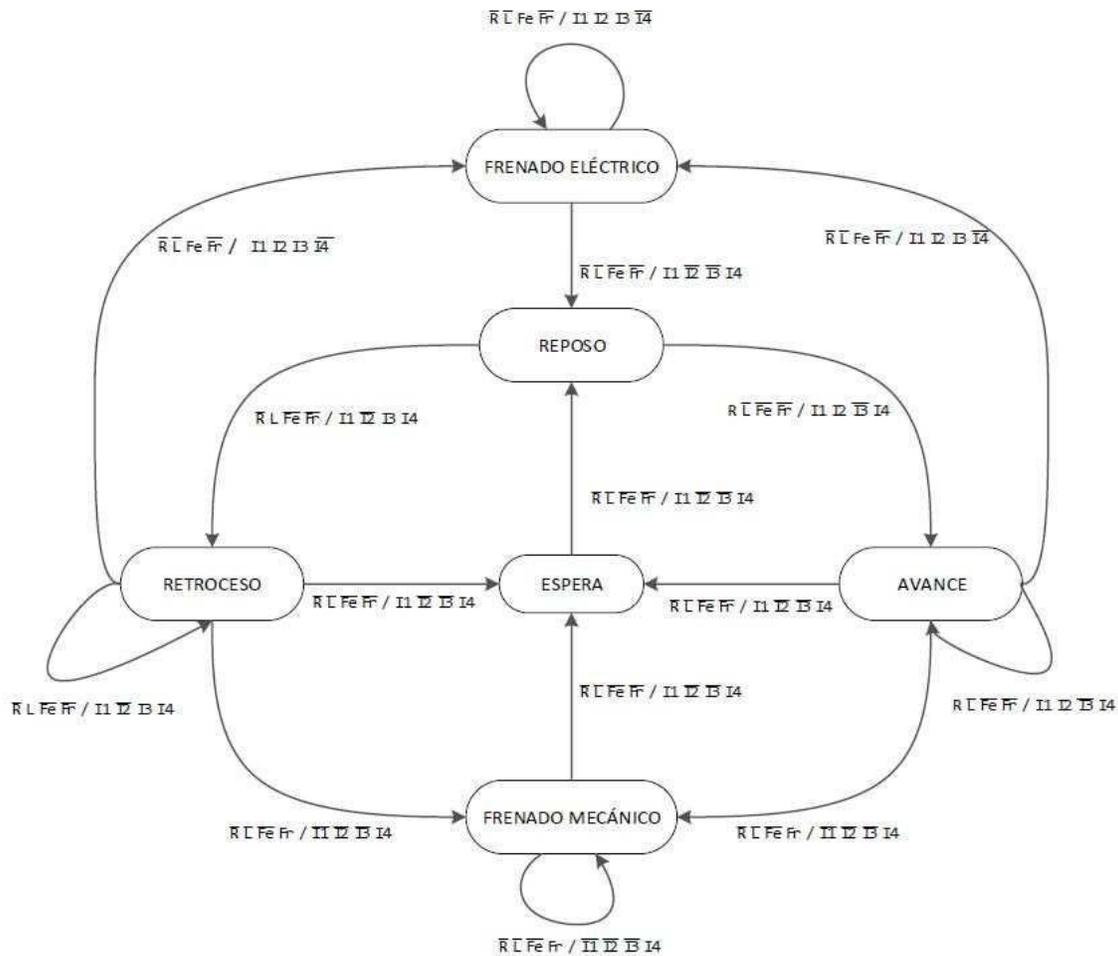


(c) Apariencia final en volante

Una vez diseñada e implementada la unidad de *mando electrónico* (hardware), es necesario realizar la implementación del *autómata* (software) correspondiente a la operación deseada del vehículo. Para ello se definen los estados operativos del sistema a partir de la *máquina de estado finito* ilustrada en la Fig. 2.19.

Figura 20.

Maquina de estados de operación para mando electrónico del vehículo



Como se observa, el sistema parte de una condición de REPOSO a partir de la cual es posible activar la condición de AVANCE o RETROCESO, dependiendo del botón accionado en el mando electrónico (*R* o *L*, respectivamente). Una vez hecho esto, el vehículo se mantendrá en movimiento a menos que se active alguna de las condiciones de FRENADO: ELÉCTRICO (a través de *Fe*) o MECÁNICO (a través de *Fr*). Si el FRENADO es ELÉCTRICO, se produce una desaceleración programada tipo rampa en el tren de potencia. Por su parte, si el FRENADO es MECÁNICO el tren de potencia se desactiva para reducir la velocidad mediante fricción mecánica.

Obsérvese que la transición al REPOSO desde los estados: AVANCE, RETROCESO y FRENADO MECÁNICO, se realiza a través de un estado de ESPERA que incorpora una rampa de desaceleración (con tiempo de 10 [s]) para proteger el tren de potencia de un cambio repentino del sentido de giro que pueda comprometer la integridad de sus componentes mecánicas. En el caso de la transición entre el estado FRENADO ELÉCTRICO y la condición de REPOSO, lo anterior no se requiere debido a las características previamente descritas para ese estado. Adicionalmente, cada condición de transición define valores de salida en las variables $\{I1, I2, I3, I4\}$ correspondientes con las entradas digitales del VFD.

La configuración realizada para dichos comandos de acción del motor se realizó como sigue:

I1: Se configuro en modo *ON/OFF1* a partir de la instrucción $P\ 0701 = 1$. Un nivel de entrada alto activa la operación del VFD, mientras que un nivel de entrada bajo activa un frenado eléctrico tipo rampa con tiempo $P\ 1121 = 10$ [s];

I2: Se configuro en modo *selector de frecuencia fija bit0* a partir de la instrucción $P\ 0702 =$ Un nivel de entrada alto activa el giro del motor hacia la izquierda (i.e. AVANCE) a velocidad fija de $P\ 1001 = -60$ [Hz], incrementada desde el reposo por una rampa con tiempo $P\ 1121 = 30$ [s];

I3: Se configuro en modo *selector de frecuencia fija bit1* a partir de la instrucción $P\ 0703 =$ Un nivel de entrada alto activa el giro del motor hacia la derecha (i.e. RETROCESO) a velocidad fija de $P\ 1002 = 30$ [Hz], incrementada desde el reposo por una rampa con tiempo $P\ 1120 = 10$ [s];

I4: Se configuro en modo *OFF2 coast to standstill* a partir de la instrucción $P\ 0704 = 3$. Un nivel de entrada bajo desactiva el VFD, permitiendo un frenado mecánico en rodadura libre.

El detalle de todas las instrucciones de configuración para el VFD se encuentra ilustrado en el manual proporcionado por el fabricante (Sinamics V20 Inverter: operating instructions, 2014).

2.5 Prototipo final implementado

El prototipo de vehículo eléctrico implementado se muestra en la Fig. 2.20. Como se observa, el sistema refleja la estructura funcional propuesta en la Fig. 2.1 y el modelo tridimensional definido previamente en la Fig. 2.14.

De otro lado, la Tabla 2.5 presenta la lista de elementos utilizados y otros gastos involucrados en la construcción del prototipo. En este punto es importante resaltar el apoyo financiero recibido por parte de la *Universidad Industrial de Santander* a través de la gestión realizada por el Profesor *Gerardo Latorre Bayona*, quien en su calidad de *Vicerrector Administrativo* facilito la compra de los elementos necesarios para la electrificación del tren de potencia del vehículo, según ODC 2020000909 realizada con la empresa DYNAMO ELECTRONICS SAS.

Tabla 5.

Costos involucrados en la realización del proyecto

Elemento	Fuente financiación	Valor COP
Motor jaula de ardilla <i>SIMOTICS</i> de 2 [HP]	UIS	\$940.000
VFD <i>SINAMICS</i> V20 200-240 [VAC]	UIS	\$1 086.000
Inversor <i>off-grid</i> onda pura NVP-2000 [W]	UIS	\$1 621.000
Cargador <i>AMPEAK</i> 25 [A] 12 [V]	UIS	\$599.000
Batería ciclo profundo 12 [V] 150 [Ah] 45.5 [kg]	UIS	\$1' 429.000
Ruedas macho de 400 [mm]	UIS	\$275.000

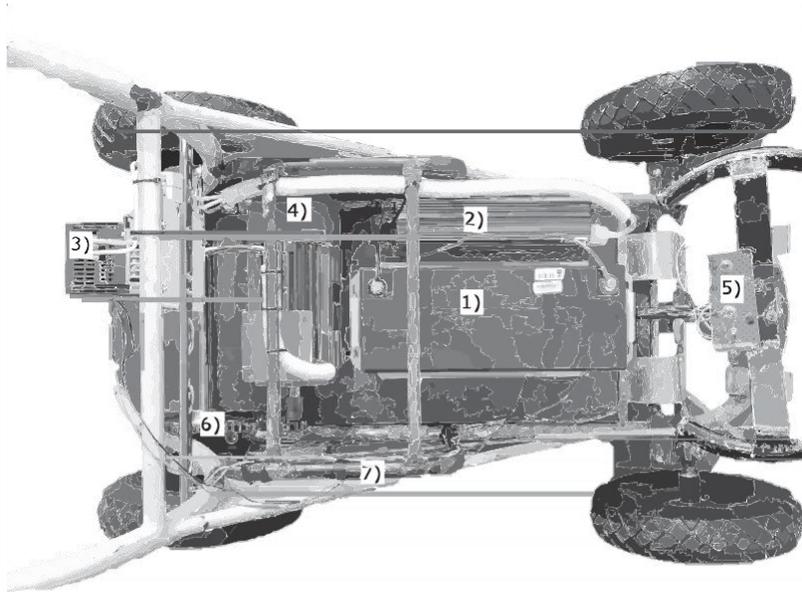
Elemento	Fuente financiación	Valor COP
Carrocería	Propia	\$250.000
Elementos adecuaciones mecánicas	Propia	\$273.800
Mano de obra	Propia	\$500.000
Elementos adecuaciones eléctricas	Propia	\$74.000
Elementos adecuaciones electrónicas	Propia	\$179.500
Pintura electrostática	Propia	\$100.000
Identidad visual	Propia	\$20.000
Transporte	Propia	\$150.000
	TOTAL	\$7 495.300

Figura 21.

Prototipo de vehículo eléctrico E3carT



(a) vista isométrica



(b) detalle de componentes: batería (1), inversor (2), VFD (3), motor (4), mando electrónico (5), acople de tracción mecánica (6) y carrocería (7)

3. Análisis experimental

En complemento al dimensionamiento, selección y acople de componentes realizado para el prototipo de vehículo eléctrico, el presente *Capítulo* se enfoca en la descripción de un conjunto de pruebas desarrolladas para verificar la correcta operación del sistema experimental: E3carT.

3.1 Pruebas de componentes individuales

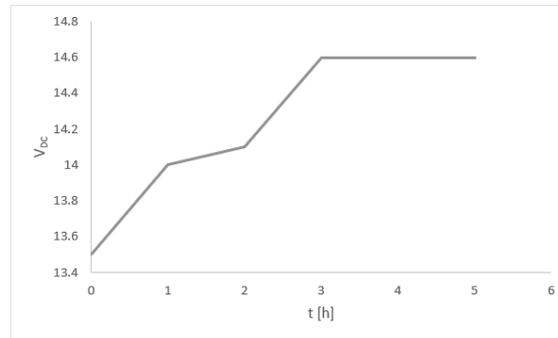
Inicialmente y posterior a la compra de los elementos relacionados en la Tabla 2.5 para la *electrificación del tren de potencia*, se requirió verificar el apropiado funcionamiento de los dispositivos individuales.

Para ello se realizaron los siguientes montajes y pruebas:

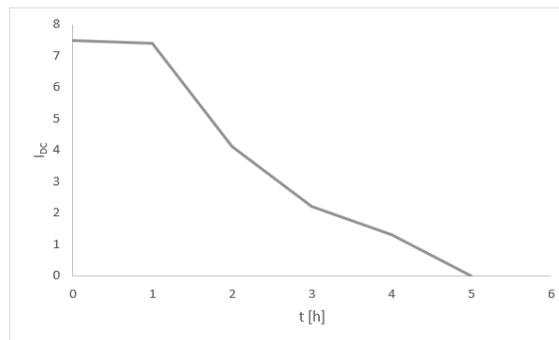
1. *Verificación de carga de batería*: empleando la conexión directa para el cargador de batería mostrado en la Fig. 2.9(b), siendo alimentado en su entrada desde la red de distribución y conectando en su salida la batería de *Plomo-acido* seleccionada. A través de las indicaciones del panel de visualización del cargador y la lectura de un multímetro fue posible verificar que tanto el cargador como la batería presentaban un comportamiento acorde con sus características técnicas. En particular, la Fig. 3.1 muestra el comportamiento temporal de los datos tabulados durante dicha prueba a partir de los cuales se destaca el tiempo de carga total (de alrededor 5 [h]), el valor de tensión en que se satura la carga (de 14.6 [VDC]) y el rango de voltaje mínimo para la condición de descarga (cercano a los 13.4 [VDC]);

Figura 22.

Comportamiento de variables eléctricas durante carga de batería



(a) Voltaje de carga



(b) Corriente de carga

2. *Verificación de conjunto inversor + motor:* con la batería cargada se procedió a alimentar el inversor de potencia y a su vez conectar en su salida el VFD acoplado al motor de inducción, con lo cual mediante operación manual del panel *BOP* fue posible manipular la operación de la maquina desde el reposo y hasta velocidades en un bajo rango de valores.

La Fig. 3.2 ilustra los montajes realizados para las pruebas de componentes individuales.

Figura 23.

Ilustración para pruebas de componentes individuales



(a) Cargador y batería



(b) Batería e inversor



(c) Operación manual VFD

3.2 Pruebas mecánicas en vacío

Una vez verificado el estado de los elementos para la *electrificación del tren de potencia*, se realizó el acople entre las componentes eléctricas y mecánicas del prototipo a través de una prueba en vacío; es decir, sin carga adicional a la de rodamientos y acoples de tracción mecánica.

Para ello se realizaron los siguientes montajes y pruebas:

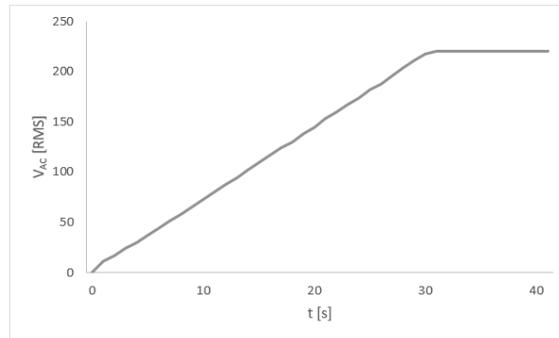
1. *Verificación de rampa de aceleración*: con las ruedas traseras del vehículo en modo flotante (i.e. sin contacto con el suelo) y sin la presencia del tripulante, se realizó la programación y ejecución en el VFD para una rampa de arranque desde el reposo y hasta la velocidad nominal del motor. A partir de ello, los valores eficaces de voltaje y corriente suministrados a la máquina y adquiridos desde el VFD se muestran en la Fig. 3.3. Como se observa, se verifica una tendencia creciente con pendiente constante para el incremento de voltaje (ver Fig. 3.3(a)) consistente con la rampa programada. Asimismo, es interesante observar el pico de corriente en el arranque, que eventualmente se mantiene en un valor fijo (ver Fig. 3.3(b)) posterior a vencerse la inercia;

2. *Verificación de velocidad en el eje de las ruedas*: utilizando un sensor de *efecto Hall* y procesamiento de datos a través de un microcontrolador *Arduino*, se obtuvo la gráfica mostrada en la Fig. 3.3(c) a través de la cual fue posible confirmar que ante condiciones nominales de operación la velocidad angular de las ruedas del prototipo experimental (ω_2 en el diagrama de bloques de la Fig. 2.1) corresponde con un valor cercano a $1720 \text{ [rpm]} \approx 344 \text{ [rpm]}$. Los cambios de tendencia en la curva son atribuibles a ruidos de medida (tanto eléctricos como mecánicos por vibración) y al procesamiento de datos experimentales (para un periodo de muestreo de 10 [s]). Por su parte, el sensor de *efecto Hall* utilizado se muestra en la Fig. 3.4.

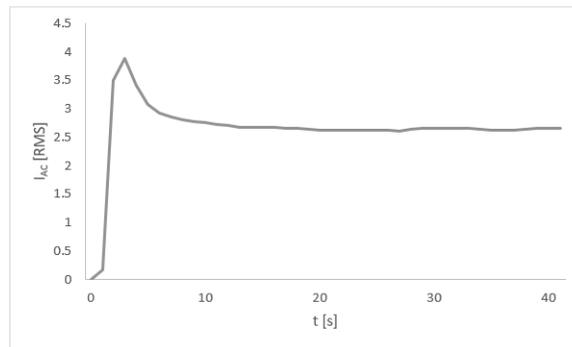
La Fig. 3.5 ilustra los montajes realizados para las pruebas mecánicas en vacío.

Figura 24.

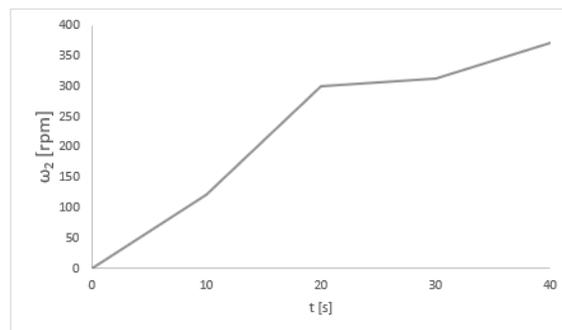
Magnitudes eléctricas para prueba mecánica en vacío



(a) Tensión VFD



(b) Corriente VFD



(c) Velocidad ω_2 en eje de ruedas

Figura 25.

Sensor de efecto Hall utilizado para medir ω_2

**3.3 Pruebas tripuladas en campo**

Posterior a la verificación del apropiado acople entre las componentes mecánicas y eléctricas del prototipo en condiciones de vacío, se procedió a realizar pruebas de conducción tripuladas.

Para ello, se eligió como escenario la *cancha de futbol municipal de Piedecuesta* (ver Fig. 3.6) donde se realizó la operación del vehículo por parte de su tripulante según las condiciones descritas en la *máquina de estados* de la Fig. 2.19. Particularmente, las curvas de arranque para corriente, voltaje y frecuencia capturadas a partir del VFD se muestran en la Fig. 3.7.

Como se observa, la gráfica de tensión aplicada a la maquina (ver Fig. 3.7(a)) presenta un comportamiento similar al verificado para la prueba en vacío (al menos hasta el rango de valores capturado). Por su parte, el comportamiento de la corriente para la prueba en campo (ver Fig. 3.7(b)) es más errático debido a vibraciones mecánicas y a la operación bajo régimen de carga del VFD. Fue precisamente la incidencia de dichas variaciones lo que motivo a no graficar para este

caso la lectura de velocidad obtenida por el sensor de *efecto Hall*, pues era prácticamente ilegible. No obstante, tomando en cuenta la relación existente entre la frecuencia de alimentación f en el estator y la velocidad de operación ω_1 en [rpm]

Figura 26.

Ilustración para pruebas mecánicas en vacío



(a) Vehículo en modo flotante



(b) Medición de variables en VFD



(c) Medición de variables con multímetro

Figura 27.

Ilustración pruebas tripuladas en cancha municipal de Piedecuesta



para la máquina de inducción (Chapman, 2000):

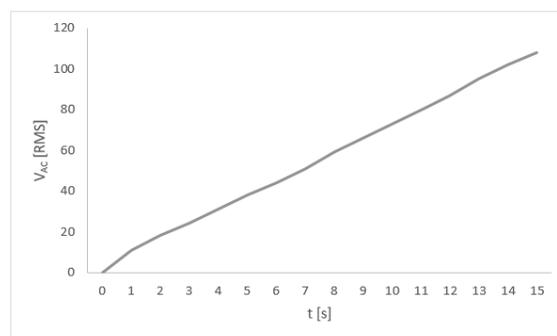
$$\omega_1 = \frac{60 \times f}{p} (1 - s)$$

ante un deslizamiento s y un número p de pares de polos, es posible relacionar el cambio de frecuencia de alimentación ilustrado en la Fig. 3.7(c) con el cambio de velocidad en el eje de la maquina (ω_1 en el diagrama de bloques de la Fig. 2.1). Así entonces, la utilidad de la información mostrada en la Fig. 3.3(c) corresponde con la verificación experimental para la relación de transformación N dada por el acople de tracción mecánica.

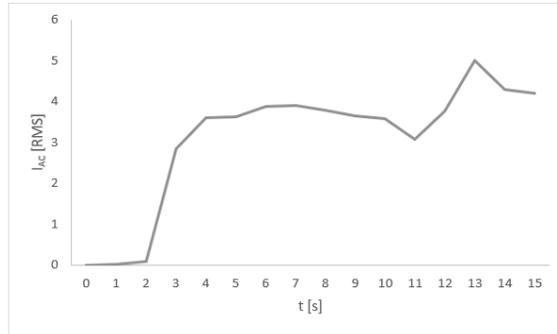
Finalmente, en la Fig. 3.8 se observa el patrón de descarga del voltaje de la batería durante las pruebas de campo. En particular, se verifica un tiempo de alrededor 35 [min] de autonomía para el sistema diseñado, lo cual satisface las expectativas del dimensionamiento propuesto en la *Subsección 2.1.5*. También es importante resaltar la escasa excursión de voltaje desde el valor a máxima carga (14.6 [VDC]) y la tensión considerada como condición de descarga, detectada automáticamente por el VFD a partir de la activación de la *alarma de subtensión* (identificada con el código F3). Para este caso la corriente de descarga tampoco fue graficada debido a la excesiva influencia del ruido (eléctrico y mecánico) de medida, que la hicieron ilegible.

Figura 28.

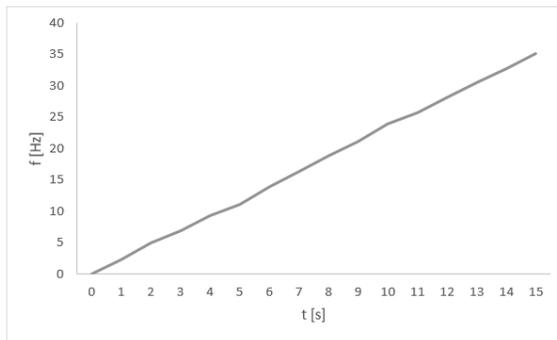
Magnitudes eléctricas en VFD para prueba tripulada en campo



(a) Tensión



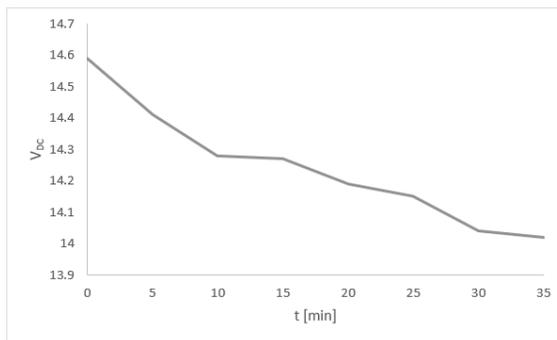
(b) Corriente



(c) Frecuencia

Figura 29.

Comportamiento de voltaje durante prueba de descarga en batería



4. Conclusiones

A partir de los desarrollos presentados y los resultados obtenidos, es posible enunciar la siguiente conclusión general:

Se electrificó la motorización de un prototipo primitivo de vehículo para potencial estudio de movilidad eléctrica en la E3T-UIS. En particular, a partir de la adquisición de un chasis *VTH* (vehículo de tracción humana) se procedió con el dimensionamiento de los elementos necesarios para electrificar el tren de potencia del vehículo incluyendo: batería, inversor, variador de frecuencia y motor. Asimismo, se valoraron y ejecutaron todas las posibles modificaciones y adecuaciones mecánicas de la estructura original para ajustarse a los requerimientos de un vehículo eléctrico. Posteriormente, se realizaron pruebas experimentales en campo para verificar el apropiado desempeño de las componentes mecánicas y eléctricas del prototipo acopladas como conjunto en el proyecto denominado: E3carT.

De manera más puntual:

Se diseñó la conversión de tracción humana a tracción eléctrica en un vehículo unipersonal preexistente en la E3T-UIS. Este punto se abordó con detalle en las *Subsecciones* 2.1.2 y 2.1.6, respectivamente para el cálculo de las características del motor eléctrico y del mecanismo de acople entre el eje de dicho motor y la estructura (chasis) del vehículo. De esta manera, aplicando principios fundamentales de física fue posible determinar la carga mecánica representada por la estructura y a partir de ello calcular los requerimientos de potencia para vencer las fuerzas inerciales y facilitar su movimiento, al igual que las dimensiones de un acople mecánico eficiente para modificar la carrocería original.

Se determinaron las dimensiones físicas y eléctricas de los elementos que constituyen el sistema de tracción eléctrica del vehículo modificado. Para ello, a partir de consideraciones técnicas y presupuestales se propuso la estructura general mostrada en el diagrama de bloques de la Fig. 2.1, relacionando las componentes eléctricas y mecánicas para el prototipo de vehículo eléctrico. Posteriormente, adicional a los cálculos realizados para determinar las características del motor y del acople mecánico, la *Sección 2.1* incluyó detalles correspondientes con la selección de dispositivos comerciales que satisfacen las necesidades de electrificación del tren de potencia (i.e. batería, inversor, variador de frecuencia y motor), complementados a su vez en la *Sección 2.2* por las adecuaciones mecánicas requeridas, en la *Sección 2.3* por la descripción de las conexiones eléctricas realizadas y en la *Sección 2.4* por el desarrollo de un sistema de mando electrónico para la apropiada operación del prototipo de vehículo eléctrico. El resumen de los elementos seleccionados y las adecuaciones realizadas se presenta en la relación de costos de la Tabla 2.5.

Se implementaron las adecuaciones de tracción diseñadas y se valoró la operación experimental del vehículo eléctrico a partir del desarrollo de un protocolo de pruebas. Específicamente, la Fig. 2.20 ilustra la apariencia final del prototipo de vehículo eléctrico diseñado con todas las adecuaciones eléctricas y mecánicas implementadas. Posteriormente el *Capítulo 3* incluyó la descripción para un conjunto de pruebas desarrolladas para verificar la correcta operación del sistema experimental: E3carT, incluyendo análisis para componentes individuales, pruebas mecánicas en vacío y pruebas tripuladas en campo, que en conjunto permitieron validar la pertinencia de los diseños realizados.

5. Recomendaciones

Durante las pruebas de operación en campo se hizo uso de la *cancha municipal de Piedecuesta*, por tratarse de una superficie plana y libre de obstáculos. Sin embargo, no fue posible desarrollar la máxima velocidad del prototipo desde el reposo debido a los giros que deben realizarse cada vez que se alcanza alguna de las esquinas del terreno. Adicionalmente, cuando se intentó realizar pruebas de operación sobre superficies con algún grado de inclinación, las magnitudes de corriente se incrementaron de manera significativa reduciendo la autonomía de la batería y ocasionando la activación prematura de la condición de *alarma de subtension* (F3).

Por tanto, mientras se procede a desarrollar un estudio más pormenorizado de configuraciones para minimizar las condiciones de consumo energético del prototipo, se recomienda operarlo en superficies planas, abiertas y sin pendiente, que posean además una extensión suficiente para desarrollar los valores de velocidad nominal de la máquina de inducción.

5.1 Trabajo futuro

El objetivo primordial del presente trabajo de grado correspondió con la implementación de un prototipo funcional de vehículo eléctrico. Evidentemente, un primer diseño no será siempre el más eficiente y por tanto el complemento inmediato a los resultados presentados se constituye de estudios específicos sobre configuraciones adicionales que permitan maximizar la eficiencia del conjunto de componentes eléctricas y mecánicas del prototipo. Asimismo, tomando en cuenta la posibilidad de realizar el comando electrónico de su operación, es viable a mediano plazo pensar

en la posibilidad de efectuar seguimiento de trayectorias preprogramadas (*modo piloto automático*) para algunos recorridos del sistema E3carT al interior del *Campus Central UIS*.

Referencias Bibliográficas

- Aguirre, P. S., Hidalgo, D. S., Panamá, J. A., Padilla, J. D., & Veintemilla, D. F. (2014). *Diseño de un vehículo eléctrico prototipo monoplaza para una persona parapléjica y construcción de su chasis*. Cuenca: Trabajo de grado (Ingeniero en Mecánica Automotriz), Universidad Politécnica Salesiana.
- Amaya, J. F., & Rueda, F. A. (2019). *Análisis y simulación de e-bikes empleando representación macroscópica energética: casos de estudio*. Bucaramanga: Trabajo de grado (Ingeniero Electricista), Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.
- Ardila, B. A., & Ochoa, Y. J. (2018). *Ubicación óptima de una estación de recarga pública para vehículos eléctricos en una red de distribución de energía eléctrica*. Bucaramanga: Trabajo de grado (Ingeniero Electricista), Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.
- Arévalo, J. P., Ortiz, R. D., Gama, E. N., Ramos, O. L., & Duque, J. (2014). Diseño e implementación de un prototipo de vehículo solar con almacenamiento de energía. *Revista científica* 18. No. 1, 159–165.
- Ariza, J., & Ramos, H. (2019). An educational experience with PBL in capstone projects: The case of EOLO a Colombian electric vehicle with sustainable energy systems. *IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)*, 1–9.

- Carreño, E., Vacca, E. A., & Lugo, I. (2012). Diseño y fabricación de un vehículo autónomo impulsado por energía solar. *Tecnura 16 No. 32*, 91–106.
- Cascajosa, M. (2005). *Ingeniería de vehículos: Sistemas y cálculos, 2 ed.* México: Alfaomega Grupo Editor.
- Castro, D. A., & Peña, J. S. (2011). *Diseño y construcción de un prototipo experimental de vehículo eléctrico autobalanceado unipersonal veau.* Bucaramanga: Trabajo de grado (Ingeniero Mecánico), Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica.
- Chapman, S. J. (2000). *Maquinas eléctricas.* MC Graw Hill.
- Coronado, E. R., Navarrete, J. J., & Ovalle, A. (2015). *Diseño y construcción de un vehículo biplaza tipo Buggy para uso recreativo.* Bucaramanga: Trabajo de grado (Ingeniero Mecánico), Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica.
- Cuesta, D. E., & Callejas, N. (2019). *Diseño y montaje del sistema de tracción eléctrica de un vagón.* Bucaramanga: Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico), Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.
- Ehsani, M., Gao, Y., Longo, S., & Ebrahimi, K. (2018). *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles, 3 ed.* CRC press.
- Gobierno de Colombia. (2019). *ey 1964 de junio 11 de 2019: Mediante la cual se promueve el uso de vehículos eléctricos en Colombia, Ley de la Republica 1964 .* Bogotá D.C.

- Loisel, R., Pasaoglu, G., & Thiel, C. (2014). Large-scale deployment of electric vehicles in Germany by 2030: An analysis of grid-to-vehicle and vehicle-to-grid concepts. *Energy Policy* 65, 432–443 .
- Martin, C., & Mocholi, R. (2016). *Diseño y optimización del chasis de un vehículo eléctrico autónomo*. Barcelona: Trabajo de grado (Ingeniería en Tecnologías Industriales), Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria de Projectes i de la Construcció, .
- Masiero, G., Ogasavara, M. H., Conde, A., & Risso, M. L. (2016). Electric vehicles in China: BYD strategies and government subsidies. *RAI Revista de Administração e Inovação* 13 no. 1, , 3–11.
- Mohd Fakharuzi, M., Syed Omar, S., Ward, T. A., Sheng, O. C., Hanapi, S., & Sainan, K. I. (2015). Design and testing of inertia dynamometer for prototype fuel cell electric vehicle. *ARPJN Journal of Engineering and Applied Sciences* 10 No. 17, 7416-7422.
- Quiros-Tortos, J., Victor-Gallardo, L., & Ochoa, L. (2019). Electric vehicles in Latin America: slowly but surely toward a clean transport. *IEEE Electrification Magazine* 7 no. 2, 22–32.
- Ramos, A. R., & Soto, F. (2013). *Propuesta del prototipo de un vehículo eléctrico sustentable*. Ciudad de México,,: Trabajo de grado (Ingeniero Electricista), Instituto Politecnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.
- Rashid, M. H. (2001). *Electrónica de potencia, circuitos, dispositivos y aplicaciones, vol. 2*. Prentice Hall Inc.
- Republica de Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; Ministerio de Minas y Energía; Ministerio de Transporte; Unidad de Planeación Minero Energética UPME.

(2019). *Estrategia nacional de movilidad eléctrica, Memoria de trabajos de difusión científica y técnica*, . Bogotá D. C. .

Sinamics V20 Inverter: operating instructions. (2014). *Technical reference manual*, Siemens AG.

Soltani-Sobh, A., Heaslip, K., Stevanovic, A., Bosworth, R., & Radivojevic, D. (2017). Analysis of the electric vehicles adoption over the United States. *Transportation Research Procedia* 22, 203–212.