

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE PROPULSIÓN PARA UN PROTOTIPO PRIMITIVO DE VEHÍCULO ELÉCTRICO PARA LA E3T-UIS

Daniel Eduardo Lizarazo Rosas

José David Angarita Pertuz

Universidad Industrial de Santander

Escuela de Ingenierías

Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2021

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE PROPULSIÓN PARA UN PROTOTIPO PRIMITIVO DE VEHÍCULO ELÉCTRICO PARA LA E3T-UIS

Daniel Eduardo Lizarazo Rosas

José David Angarita Pertuz

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

Director

Ricardo Alzate Castaño, Ph.D.

Universidad Industrial de Santander

Escuela de Ingenierías

Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2021

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	5
1.1.1. Objetivo general	5
1.1.2. Objetivos específicos	5
2. Diseño del prototipo de vehículo eléctrico	6
2.1. Etapas principales del sistema	6
2.1.1. Carrocería	7
2.1.2. Motor eléctrico	8
2.1.3. Variador de frecuencia	13
2.1.4. Inversor de potencia	15
2.1.5. Batería	18
2.1.6. Acople de tracción mecánica	21
2.2. Adecuaciones mecánicas	23
2.3. Adecuaciones eléctricas	26
2.4. Adecuaciones electrónicas	28
2.4.1. PIC18F4550	29
2.4.2. Pantalla led LCD	30
2.4.3. Modulo adaptador i2c para LCD.	35
2.4.4. Modulo joystick.	37
2.4.5. Optoacoplador.	38
2.4.6. Regulador de tensión lm7805	40
2.4.7. Sensor de fuerza fsr 402	40

2.4.8. Proteus	41
2.4.9. MikroC Pro	43
2.4.10. Diseño final	43
2.4.11. Algoritmo implementado	44
2.4.12. Ensamble en el vehículo	47
2.4.13. Configuración VFD	49
Bibliografía	53

Lista de Figuras

1.1. Partes principales de un EV	2
2.1. Diagrama de bloques funcional para el prototipo de vehículo	7
2.2. Ilustración para carrocería de un vehículo	8
2.3. Chasis <i>VTH</i> adquirido para el trabajo de grado	9
2.4. Modelo tridimensional con medidas	10
2.5. Motor de inducción seleccionado	14
2.6. VFD seleccionado	16
2.7. Inversor de potencia seleccionado	18
2.8. Cuadro resumen para principales tipos de batería	19
2.9. Batería y cargador de batería seleccionados	20
2.10. Acople de engranajes por cadena	21
2.11. Acople real implementado en el vehículo	22
2.12. Rueda neumática seleccionada	23
2.13. Rodamientos empleados en adecuaciones	24
2.14. 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	25
2.15. Identidad visual para prototipo de vehículo eléctrico	26
2.16. Esquema de conexiones eléctricas del prototipo: diagrama de mando (dere- cha) y potencia (izquierda)	27
2.17. PIC18f4550 utilizado en la tarjeta de desarrollo.	29
2.18. Medidas Panel Led LCD.	31
2.19. Arreglo de Nibles.	33

2.20. Instrucciones del LCD.	33
2.21. Memoria de caracteres.	34
2.22. Codigo para la letra A	35
2.23. Activación RS y E	35
2.24. Desactivación de E	35
2.25. Led LCD utilizado en el proyecto	36
2.26. Expansor de pines Led LCD(Fuente Mercado Libre).	36
2.27. Ciclos de reloj en comunicación I2C.	37
2.28. Joystick Arduino (Fuente Mercado Libre).	38
2.29. Valores mediante ADC de arduino de 8 bits.	39
2.30. Opctoacoplador MCT6 fuente: https://www.didacticaselectronicas.com/	39
2.31. Encapsulado optoacoplador MTC6: https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/5364	
2.32. Regulador de tension LM7805 fuente: https://www.hwlibre.com/lm7805/	41
2.33. Sensor de fuerza fsr 402 fuente: Mercado Libre	41
2.34. Conexión sensor de fuerza fsr 402	42
2.35. Valores analogos medidos	42
2.36. Esquema electrónico.	44
2.37. PCB.	45
2.38. PCB 3D.	45
2.39. Algoritmo.	46
2.40. Parte frontal del volante.	47
2.41. Parte trasera del volante.	48

Capítulo 1

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 [28].

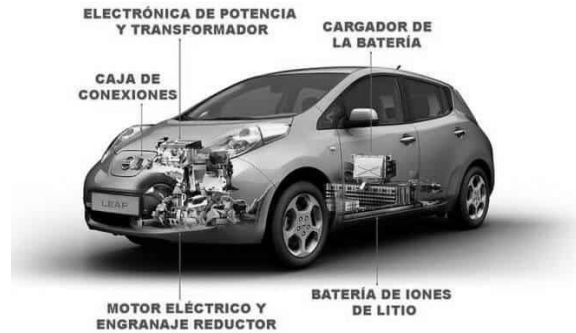


Figura 1.1: Partes principales de un EV (tomado de Wikipedia.org)

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 sólo se había logrado el 25 % de dicha meta, hecho que motivó un incremento de incentivos para grandes compañías productoras como Nissan, BMW y Citroën [26]. 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 sólo 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*) [33].

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 [30].

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 [1]. Todo lo anterior está articulado con la Ley 1964 del 11 junio de 2019 a partir de la cual la Presidencia de la República promueve el uso de EV en Colombia [19].

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.* [17] 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* [18] 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* [15]. De manera más reciente, *Amaya y Rueda* [5] realizaron el modelado de una bicicleta eléctrica utilizando la aproximación energética macroscópica. Otros trabajos como el de *Ardila y Ochoa* [6] 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 [7]. Adicionalmente, en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas se realizó el diseño y fabricación de un vehículo impulsado por energía solar [14] y en la Universidad

Militar Nueva Granada se analizó un caso similar al anterior, pero con almacenamiento energético [8].

Otros desarrollos importantes incluyen el proyecto independiente *ECO-City* que construye EV para comercialización en Colombia (<http://www.eco-citi.com/auto-electrico/>) 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 [31] y en Ecuador el trabajo de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca [4]. 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 [27].

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 VE, 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: ¿Qué 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?

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

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

1.1.2. 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.

Capítulo 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.

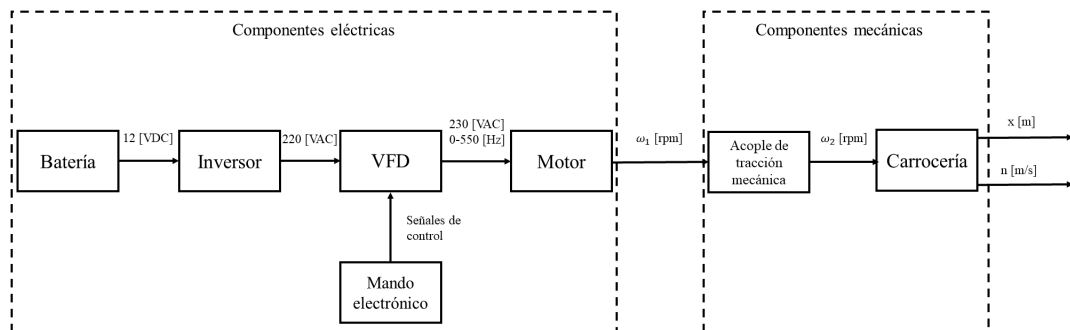


Figura 2.1: Diagrama de bloques funcional para el prototipo de vehículo

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* [?]. 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]



Figura 2.2: Ilustración para carrocería de un vehículo

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).

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 Jaimés Rolón* (Profesor adscrito a la EIM-UIS) y las *Secciones 2.2/2.3* de [20] 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 $30 \text{ [km/h]} \equiv 8.33 \text{ [m/s]}$, 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;

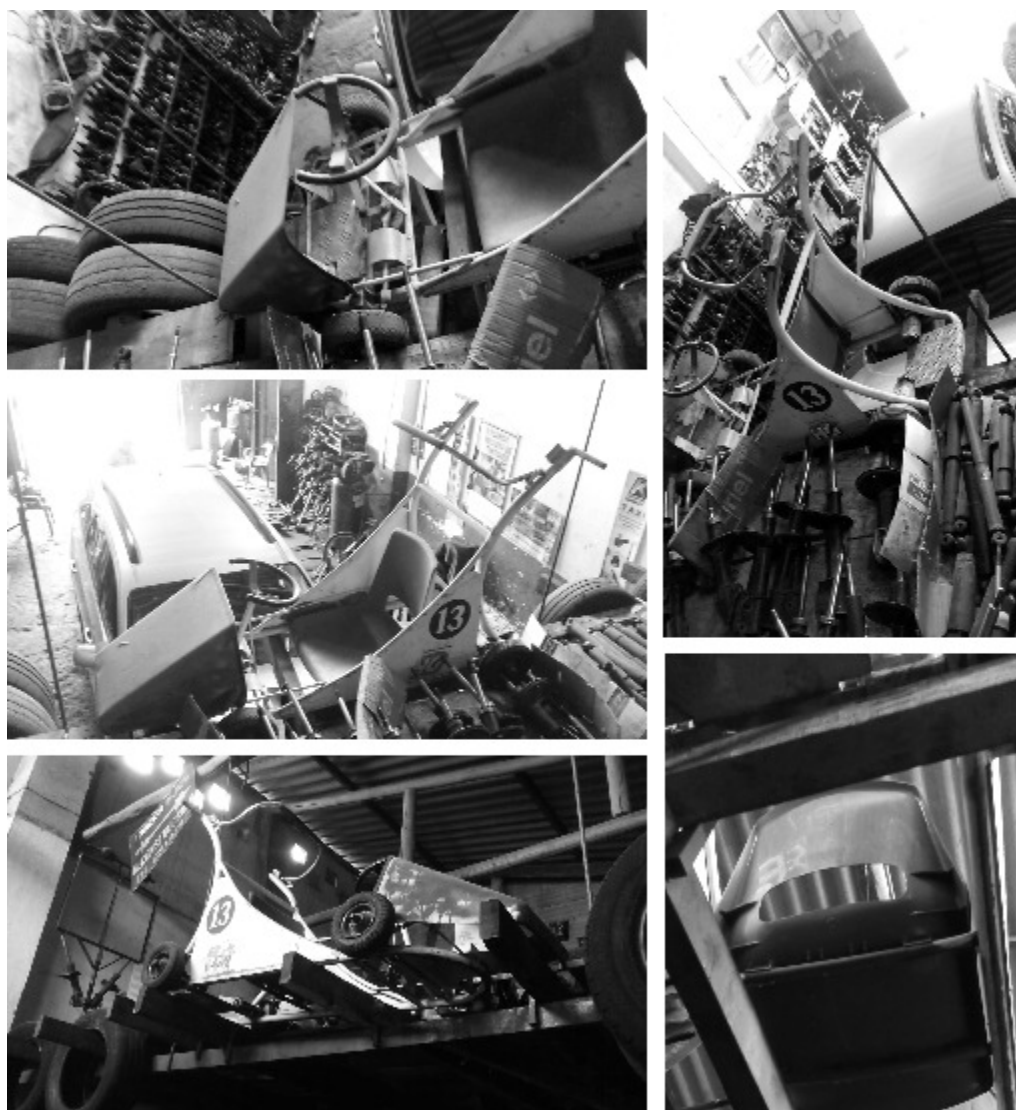
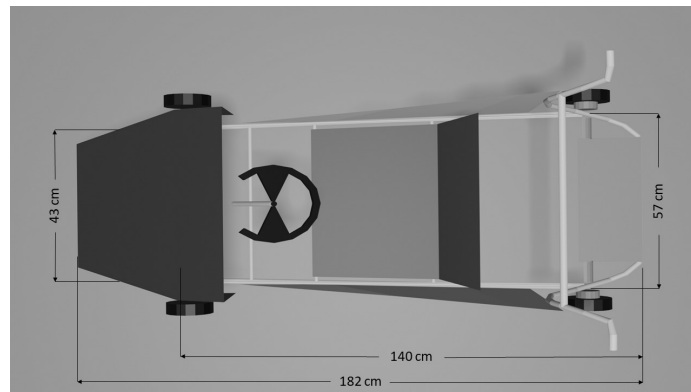
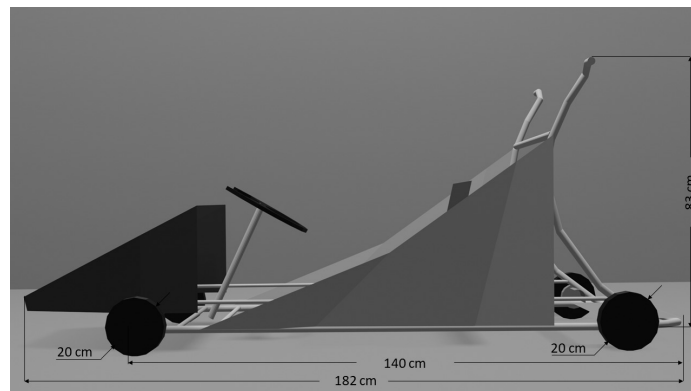


Figura 2.3: Chasis *VTH* adquirido para el trabajo de grado



(a) Vista superior



(b) Vista lateral derecha

Figura 2.4: Modelo tridimensional con medidas

- 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];
- Área 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:

$$\begin{aligned}
\tau_r &= 4 \times I_r \times \left(\frac{v_{cm}}{t_a} \right) \\
&= 4 \times \left(\frac{m_r}{2} \times (r_i^2 + r_e^2) \right) \times \left(\frac{v_{cm}}{t_a} \right) \\
&= 4 \times \left(\frac{3.5}{2} \times ((0.1)^2 + (0.2)^2) \right) \times \left(\frac{8.33}{30} \right) \\
&= 0.486 [Nm].
\end{aligned}$$

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 [29]. 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 [20]:

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

para un c_a 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 $30\text{ }[^\circ\text{C}]$.

Finalmente, la potencia requerida por el motor corresponde con:

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

aproximando a valores comerciales.

Ahora bien, a nivel comercial es posible adquirir motores eléctricos de $2\text{ }[HP]$ 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 más 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

Tabla 2.1: 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 2.5: Motor de inducción seleccionado

operación. En particular, un VFD mantiene constante el par de la máquina 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*.

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 2.2: 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
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 2.6: 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* [?]. 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 limitará 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 aún, 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 2.3: 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

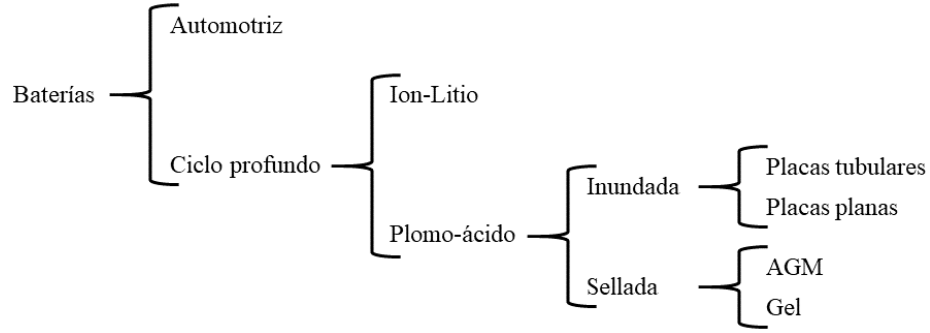


Figura 2.8: Cuadro resumen para principales tipos de batería

dos subcategorías: la *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.

Por tanto, los argumentos anteriores permiten concluir que una batería de *ciclo profundo*, *Plomo-ácido*, *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 $2 \text{ [HP]} \approx 1500 \text{ [W]}$ 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:

$$\frac{1500 \text{ [W]}}{12 \text{ [VDC]}} = 125 \text{ [A]}.$$

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 2.4: 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]



(a) Batería



(b) Cargador

Figura 2.9: Batería y cargador de batería seleccionados

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.

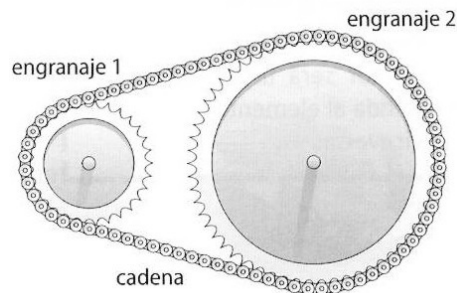


Figura 2.10: Acople de engranajes por cadena

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

$$\begin{aligned}
 N &= \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{v_{cm} [rpm]}{1720 [rpm]} \\
 &= \frac{\left(\frac{8.33 [m/s]}{2 \times \pi \times r_e [m/rev]} \times \frac{60 [s]}{1 [min]} \right)}{1720 [rpm]} \\
 &= \frac{\left(6.6288 [rev/s] \times \frac{60 [s]}{1 [min]} \right)}{1720 [rpm]} \\
 &= \frac{397.73 [rpm]}{1720 [rpm]} = 0.23 \approx \frac{1}{5},
 \end{aligned}$$

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 el 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 2.11: Acople real implementado en el vehículo

2.2. Adecuaciones mecánicas

El chasis adquirido para el desarrollo del proyecto (previamente mostrado en las Figs. 2.3 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:

- a) *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 2.12: Rueda neumática seleccionada

- b) *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;



Figura 2.13: Rodamientos empleados en adecuaciones

- c) *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 empleó una lámina 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]);
- d) *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;
- e) *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;

- f) *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;
- g) *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;

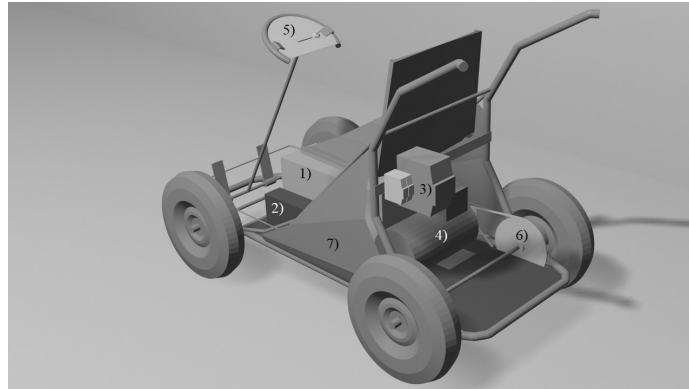


Figura 2.14: Modelo tridimensional para ubicación de equipos en vehículo modificado: 1) batería, 2) inversor, 3) VFD, 4) motor, 5) mando electrónico, 6) acople de tracción mecánica y 7) carrocería

- h) *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;

- i) *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 2.15: 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. Para el proyecto no se usó resistencia de frenado, el frenado eléctrico se realizó a través de una rampa, similar a la usada para acelerar. En la Fig. 2.16 anterior, pusimos equivocadamente una resistencia, que pudo generar la confusión, fue corregida y pedimos disculpas. Adicionalmente, se observa la inclusión de una **TARJETA DE DESARROLLO** para realizar el

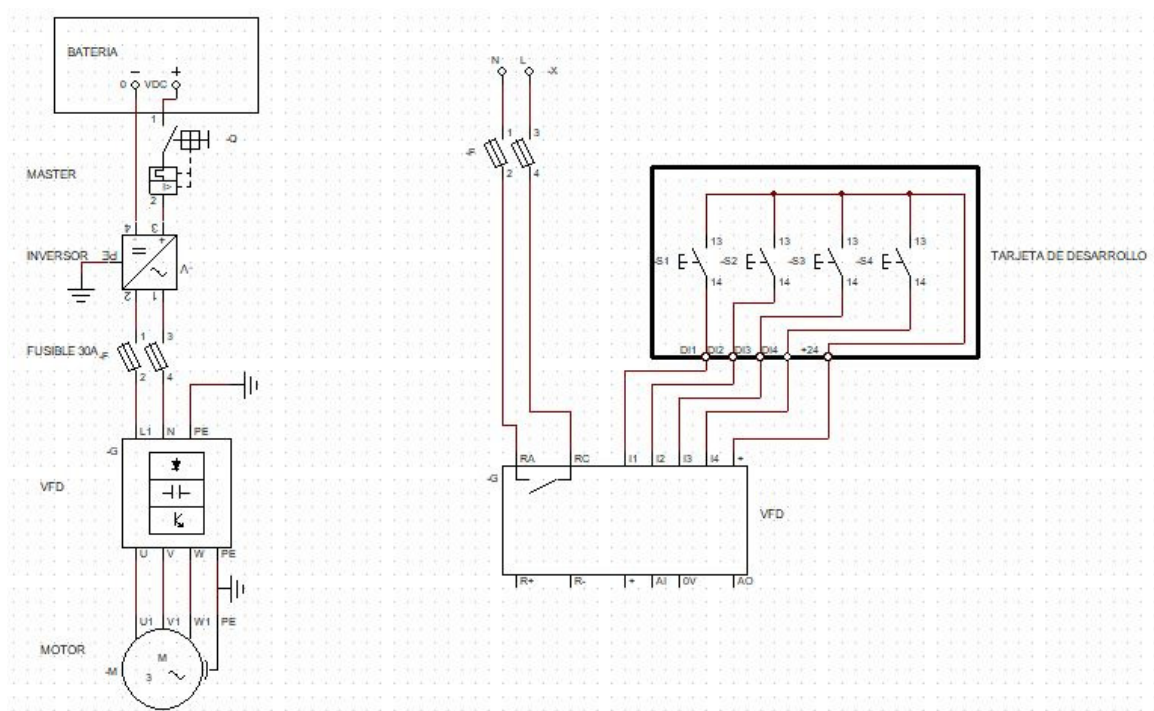


Figura 2.16: Esquema de conexiones eléctricas del prototipo: diagrama de mando (derecha) y potencia (izquierda)

control de operación del sistema según se explicará con detalle en la siguiente *Sección*.

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

Se diseñó y construyó una tarjeta de desarrollo en la que por medio del microcontrolador PIC18f4550 se facilitara una interfaz en la que el usuario pudiese controlar los estados de funcionamiento del motor por medio de las entradas digitales presentes en el variador, para este proyecto se usaron las entradas digitales 1,2,3,4 en las que se preestablecieron las configuraciones ON/OFF1, GIRO A LA DERECHA, GIRO A LA IZQUIERDA, OFF2 respectivamente.

Este sistema de desarrollo se diseñó con la idea de que fuese programable con el fin de que futuros trabajos pudiesen testear diferentes configuraciones del variador, como tal el trabajo principal de este sistema consiste en leer señales análogas y digitales de entrada, procesarlas y enviar una señal digital a los puertos del variador anteriormente mencionadas, además el sistema cuenta con una pantalla LCD (donde se muestran los diferentes estados de operaciones según las diferentes entradas ingresadas por el usuario) un módulo adaptador I2C que está basado en un controlador PCF8574 el cual es un Expansor de Entradas y Salidas digitales controlado por I2C, Un módulo joystick y un sensor de fuerza fsr 402 (utilizado como sensor del freno).

A continuación, se especifican todos los componentes contenidos en nuestro sistema de desarrollo.

- PIC18F4550.
- LCD 16X2.
- MODULO ADAPTADOR I2C PARA LCD.
- MODULO JOYSTICK.

- OPTOACOPLADOR.
- REGULADOR DE TENSION LM7805.
- SENSOR DE FUERZA FSR 402.

2.4.1. PIC18F4550

Este microcontrolador es fabricado por la compañía MICROCHIP y es uno de los microcontroladores de 8 bits mas potentes ofrecidos por la misma, pertenece a la familia PIC18f. estas son algunas de las características presentes en este microcontrolador. La Fig. 2.17 muestra el aspecto del microcontrolador. (<https://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC18F4550>)

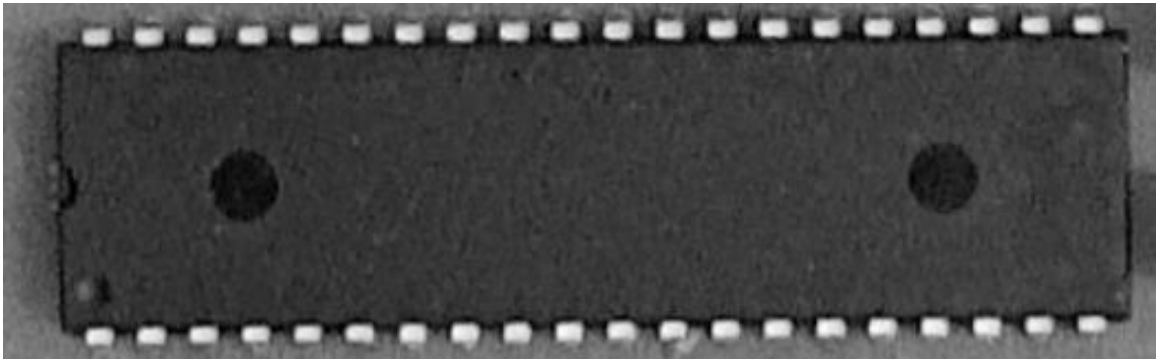


Figura 2.17: PIC18f4550 utilizado en la tarjeta de desarrollo.

- Memoria flash de 32kb.
- Memoria EEPROM de 256 bytes.
- Memoria SRAM de 2048 bytes.
- 100.000 ciclos de borrado y escritura en la memoria flash.
- 1.000.000 ciclos de borrado y escritura en la memoria EEPROM
- Retencion en memoria ¿40 años.
- Periféricos de comunicación digital (1-UART, 1-SPI, 1-I2C1-MSSP (SPI / I2C)).

- Entradas ADC resolución de 10 bits.
- Modulos USB
- Oscilador externo de hasta 48 MHz.
- Bloque de oscilador interno con 8 frecuencias de reloj seleccionables desde 31 kHz hasta 8 MHz.
- Corriente máxima en los pines de 25 mA.
- Rango de temperatura de funcionamiento desde -40 °C hasta 85 °C.
- Rango de voltaje de funcionamiento de 2 voltios hasta 5.5 voltios.
- 40 pines en total.

La función principal de el microcontrolador es trabajar las diferentes señales que entregan el joystick y el sensor de fuerza ya que son señales análogas, a su vez realiza el procesamiento programado y entrega señales digitales a su vez que envía información a la pantalla led para mostrar los respectivos mensajes, el motivo de adquisición de este microcontrolador se debe principalmente a la fácil adquisición del mismo en el comercio local y a que ya se contaban con 2 ejemplares utilizados anteriormente en proyectos de clases, se implementó el bloque del oscilador interno con una frecuencia de 8MHz la cual es la máxima frecuencia permitida con oscilador interno.

2.4.2. Pantalla led LCD

LCD (Liquid Crystal Display de sus siglas en inglés) Este dispositivo se puede encontrar en varias configuraciones, todo depende de la cantidad de caracteres y los renglones que posea dicho panel, el principio de funcionamiento del dispositivo consiste en dos capas conductoras que debido al material cristalino que los compone, se polariza según la corriente que se le esté suministrando al dispositivo permitiendo ver los diferentes contrastes en la pantalla.

En el proyecto consideramos que una pantalla led de dieciséis caracteres y dos renglones era más que suficiente para que el usuario pudiese ver los diferentes estados de funcionamiento que estaría enviando al variador, este dispositivo cuenta una luz de fondo opcional para poder leer en caso de alta iluminación en el medio, la medida del dispositivo se encuentra encontradas relacionadas en la Fig. 2.18 donde también se encuentran consignadas las medidas del panel y circuito impreso en el cual esta ensamblado dicho panel.

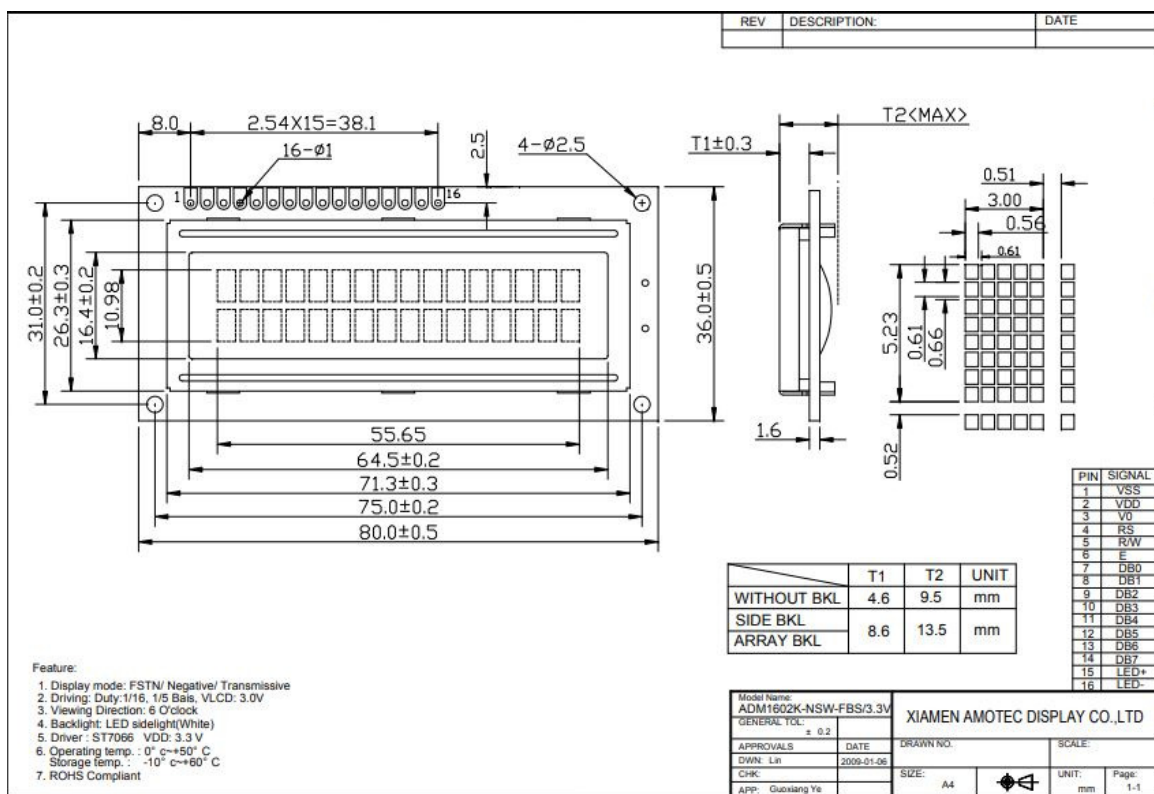


Figura 2.18: Medidas Panel Led LCD.

Características

- Consumo del orden de 7.5mW.
- Caracteres ASCII, kanji, griegos y símbolos matemáticos.
- Desplazamiento hacia la izquierda o la derecha.

- Memoria de 40 caracteres por línea de pantalla, visualizándose solo 16 de ellos.
- Movimiento del cursor y cambio de aspecto.
- Permite programar 8 caracteres.
- Puede ser gobernados por conexión bus de 4 bits o conexión bus de 8 bits.
- 5x8 puntos con cursor

El dispositivo cuenta con la siguiente distribución de pines mostrado en la tabla 2.5.

Tabla 2.5: Distribución de pines

Pin N°	Símbolo	Función
1	Vss	Señal de GND (tierra)
2	Vdd	Alimentación preferible de 5V
3	Vo	Ajuste de contraste
4	RS	Se elige el modo de trabajo ya sea para escribir o para configurar**
5	R/W	Señal de lectura o escritura, utilizado principalmente por microcontroladores al mo
6	E	Habilitador de los registros
7-10	DB0-DB3	Los nibles de separación de caracteres que corresponden a los primeros (inferiores),
11-14	DB4-DB7	Segunda trama de nibles (superiores)*
15	LED+	Led de pantalla
16	LED-	Led de pantalla

*ver la Fig. 2.19 para entendimiento de los nibles.

**estas entradas son usadas por los microcontradores ya que los mismo necesitan escribir, leer y configurar según los ciclos de reloj, para probar el SET de configuraciones descritos en el Datasheet estos no son necesarios.

Este dispositivo cuenta con un bloque de memoria donde están almacenados los diferentes nibles que forman los caracteres Fig.2.21, sin embargo, también cuenta una memoria RAM llamada CGRAM (RAM generadora de caracteres) es la memoria en la cual quedan almacenados los caracteres especiales que yo edite.

Para poder generar un carácter en el panel existe un conjunto de instrucciones descritos en la Fig.2.20 los cuales nos indicas la forma en la que el controlador de el LCD sabe que instrucción ejecutar.

Character Code (DDRAM Data)								CGRAM Address						Character Patterns (CGRAM Data)									
b8	b7	b6	b5	b4	b3	b2	b1	b0	b5	b4	b3	b2	b1	b0	b7	b6	b5	b4	b3	b2	b1	b0	
0	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	1	1	1	1	1	
						0	0	0				0	0	1				0	0	0			
						0	0	0				0	1	0				0	0	1	0	0	
						0	0	0				0	0	1				1	0	0	1	0	0
						0	0	0				0	1	0				0	0	0	1	0	0
						0	0	0				0	1	0				1	0	0	1	0	0
						0	0	0				0	1	1				0	0	0	1	0	0
						0	0	0				0	1	1				1	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	-	0	0	1	0	0	1	0	0	0	-	-	-	1	1	1	1	0	
						0	0	1				0	0	1				1	0	0	0	1	
						0	0	1				0	1	0				1	0	0	0	1	
						0	0	1				0	1	1				1	1	1	1	0	
						0	0	1				1	0	0				1	0	1	0	0	
						0	0	1				1	0	1				1	0	0	1	0	
						0	0	1				1	1	0				1	0	0	0	1	
						0	0	1				1	1	1				0	0	0	0	0	

Figura 2.19: Arreglo de Nibbles.

Instruction	Instruction code										Description	Execution time (fosc= 270 KHZ)
	RS	R/V	DB ₇	DB ₆	DB ₅	DB ₄	DB ₃	DB ₂	DB ₁	DB ₀		
Clear Display	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	Write "20H" to DDRA and set DDRAM address to "00H" from AC	1.53ms
Return Home	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-	Set DDRAM address to "00H" From AC and return cursor to its original position if shifted. The contents of DDRAM are not changed.	1.53ms
Entry mode Set	0	0	0	0	0	0	0	1	I/D	SH	Assign cursor moving direction And blinking of entire display	39us
Display ON/OFF control	0	0	0	0	0	0	1	D	C	B	Set display (D), cursor (C), and Blinking of cursor (B) on/off Control bit.	
Cursor or Display shift	0	0	0	0	0	1	S/C	R/L	-	-	Set cursor moving and display Shift control bit, and the Direction, without changing of DDRAM data.	39us
Function set	0	0	0	0	1	DL	N	F	-	-	Set interface data length (DL: 8-Bit/4-bit), numbers of display Line (N: =2-line/1-line) and, Display font type (F: 5x11/5x8)	39us
Set CGRAM Address	0	0	0	1	AC5	AC4	AC3	AC2	AC1	AC0	Set CGRAM address in address Counter.	39us
Set DDRAM Address	0	0	1	AC6	AC5	AC4	AC3	AC2	AC1	AC0	Set DDRAM address in address Counter.	39us
Read busy Flag and Address	0	1	BF	AC6	AC5	AC4	AC3	AC2	AC1	AC0	Whether during internal Operation or not can be known By reading BF. The contents of Address counter can also be read.	0us
Write data to Address	1	0	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	Write data into internal RAM (DDRAM/CGRAM).	43us
Read data From RAM	1	1	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	Read data from internal RAM (DDRAM/CGRAM).	43us

Figura 2.20: Instrucciones del LCD.

ESCRITURA DE PALABRAS

Para poder escribir utilizaremos el pin RS cada vez que en los pines de D0-D7 ingresemos el código requerido para cada tipo de letra segun Fig.2.21. Después procedemos a activar el pin E(enable) y luego lo apagamos.

17-16 15-10	0000	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111	1000	1001	1010	1011	1100	1101	1110	1111
CG RAM (1)																
0000																
0001 (2)																
0010 (3)																
0011 (4)																
0100 (5)																
0101 (6)																
0110 (7)																
0111 (8)																
1000 (1)																
1001 (2)																
1010 (3)																
1011 (4)																
1100 (5)																
1101 (6)																
1110 (7)																
1111 (8)																

Figura 2.21: Memoria de caracteres.

Escritura de la letra A.

-Paso 1 Se escribe el orden de los bits para la letra A, dados en la Fig.2.21.

-Paso 2 Se activan primero RS y luego E.

-Paso 3 Se procede a apagar el pin E y vemos la letra en nuestro panel.

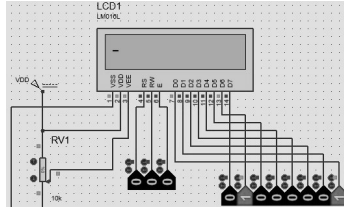


Figura 2.22: Código para la letra A

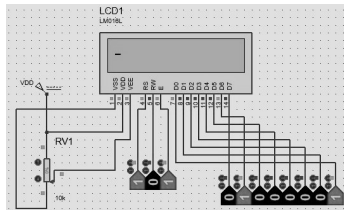


Figura 2.23: Activación RS y E

El proceso de pasos anteriormente explicado son realizados por nuestro microcontrolador, aunque para este proyecto se implemento un dispositivo complementario para realizar transmisión de información por medio del protocolo I2C.

2.4.3. Modulo adaptador i2c para LCD.

Este módulo se encuentra basado en el microcontrolador PCF8574T el cual permite conectar los 16 pines encontrados en el LCD y 4 pines en los cuales tenemos las conexiones de tierra, alimentación de 5V, la señal de datos SDA y la señal de reloj, este módulo funciona como un expensor de pines utilizados en este proyecto con el fin de reducir la cantidad pines a utilizar en la PCB, cabe resaltar que este módulo presenta la facilidad de poder cambiar el

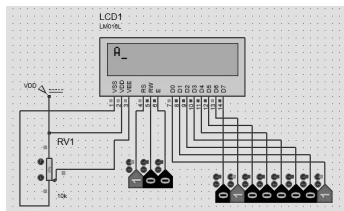


Figura 2.24: Desactivación de E



Figura 2.25: Led LCD utilizado en el proyecto

contraste de los caracteres en el panel LCD por medio de un potenciómetro, además permite encender la luz led de fondo por medio de un conmutador el cual podemos ver en la Fig.2.26

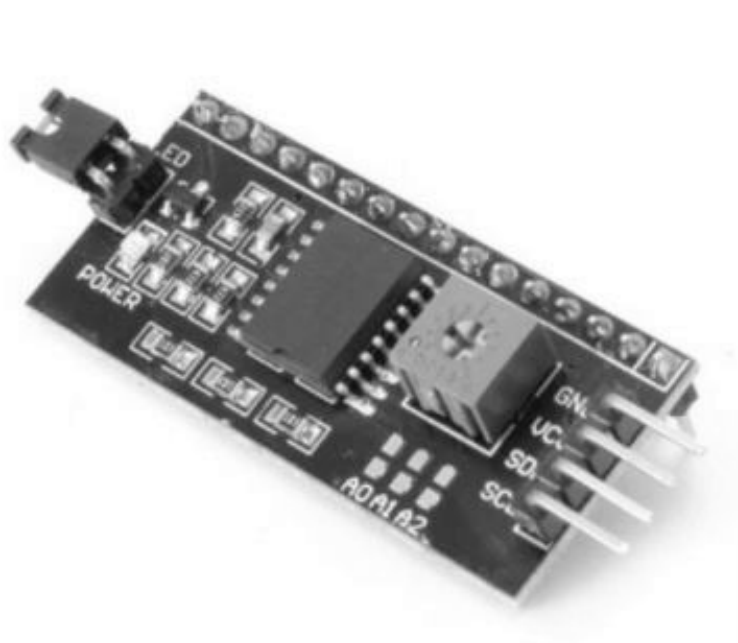


Figura 2.26: Expansor de pines Led LCD(Fuente Mercado Libre).

El protocolo de comunicación I2C permite reducir de 16 pines a 4 ya que utiliza la comunicación serial implementado por medio de un protocolo síncrono en el cual se tiene una señal de reloj y una de datos en la que el dispositivo maestro y esclavo comparten comunicación a través de una sola línea o cable, los ciclos de reloj los podemos ver representados en la Fig.2.27.

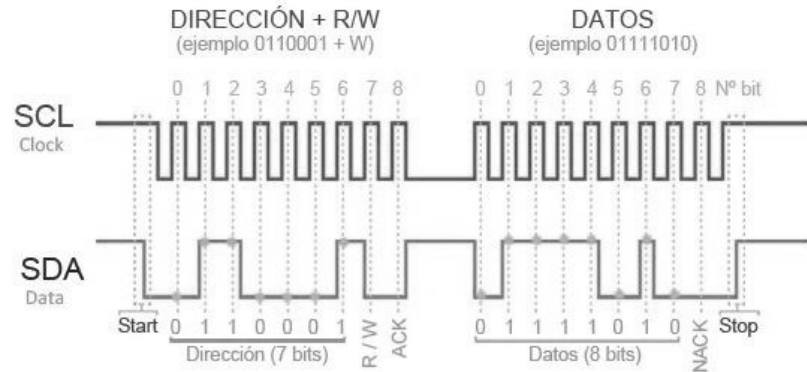


Figura 2.27: Ciclos de reloj en comunicación I2C.

La facilidad de utilizar este módulo en el proyecto se presenta a nivel de hardware ya que permite la reducción de pines a utilizar la PCB y de esa forma reducir el tamaño de la misma, sin embargo, a nivel de software es necesaria escribir el código donde se implementa el protocolo I2C en C aumentando un poco su complejidad, pero existen plantillas de código que realizan esta implementación.

2.4.4. Módulo joystick.

Un joystick es una palanca de control que permite desplazar manualmente, y con gran rapidez entre un rango analógico que está entre 0 y 5V además tiene un interrupto pull up de lógica negada (al presionar permite lectura de GND), la ventaja de implementar este módulo es que permite a la palanca de mando empezar desde una posición central y sin importar el eje de movimiento siempre retorna a esa posición inicial, este módulo posee los siguientes pines:

- GND
- Vcc
- Vx

- V_y
- SW



Figura 2.28: Joystick Arduino (Fuente Mercado Libre).

Test de lectura de señal analoga del joystick

En la Fig.2.29 se puede visualizar los valores obtenidos conversor análogo-digital de 8 bits del microcontrolador del Arduino (microcontrolador que utilizamos para comprobar el funcionamiento de cada elemento), en el cual nos sirve para ver las referencias de reposo y activado en cualquiera de sus ejes y de el pulsador ya que tiene lógica negada .

2.4.5. Optoacoplador.

Un optoacoplador también llamado optoaislador o aislador acoplado ópticamente, funciona con el fin de poder aislar eléctricamente dispositivos sensibles ya que su modo funcionamiento es básicamente un interruptor basándose en un componente que generalmente es un fototransistor el cual es saturado por medio de luz que proviene de un diodo led, permitiendo el aislamiento entre dispositivos.

El uso de este dispositivo es necesario con el fin de poder realizar las conmutaciones entre 5V que salen de nuestro microcontrolador y 24V suministrados por nuestra Variador

```

01:19:47.746 -> MOVIMIENTO EN X: 519 MOVIMIENTO EN Y: 500 PULSADOR: 1
01:19:48.016 -> MOVIMIENTO EN X: 519 MOVIMIENTO EN Y: 499 PULSADOR: 0
01:19:48.252 -> MOVIMIENTO EN X: 519 MOVIMIENTO EN Y: 499 PULSADOR: 0
01:19:48.522 -> MOVIMIENTO EN X: 519 MOVIMIENTO EN Y: 499 PULSADOR: 0
01:19:48.759 -> MOVIMIENTO EN X: 519 MOVIMIENTO EN Y: 500 PULSADOR: 0
01:19:49.032 -> MOVIMIENTO EN X: 519 MOVIMIENTO EN Y: 499 PULSADOR: 0
01:19:49.270 -> MOVIMIENTO EN X: 519 MOVIMIENTO EN Y: 499 PULSADOR: 0
01:19:49.507 -> MOVIMIENTO EN X: 519 MOVIMIENTO EN Y: 500 PULSADOR: 0
01:19:49.776 -> MOVIMIENTO EN X: 519 MOVIMIENTO EN Y: 500 PULSADOR: 1
01:19:50.017 -> MOVIMIENTO EN X: 519 MOVIMIENTO EN Y: 499 PULSADOR: 1
01:19:50.256 -> MOVIMIENTO EN X: 519 MOVIMIENTO EN Y: 499 PULSADOR: 1
01:19:50.530 -> MOVIMIENTO EN X: 519 MOVIMIENTO EN Y: 499 PULSADOR: 1
01:19:50.772 -> MOVIMIENTO EN X: 519 MOVIMIENTO EN Y: 500 PULSADOR: 0
01:19:51.010 -> MOVIMIENTO EN X: 519 MOVIMIENTO EN Y: 499 PULSADOR: 0
01:19:51.282 -> MOVIMIENTO EN X: 520 MOVIMIENTO EN Y: 500 PULSADOR: 0
01:19:51.522 -> MOVIMIENTO EN X: 519 MOVIMIENTO EN Y: 499 PULSADOR: 0
01:19:51.792 -> MOVIMIENTO EN X: 520 MOVIMIENTO EN Y: 499 PULSADOR: 0
01:19:52.033 -> MOVIMIENTO EN X: 519 MOVIMIENTO EN Y: 499 PULSADOR: 1
01:19:52.273 -> MOVIMIENTO EN X: 0 MOVIMIENTO EN Y: 499 PULSADOR: 1
01:19:52.513 -> MOVIMIENTO EN X: 130 MOVIMIENTO EN Y: 0 PULSADOR: 1
01:19:52.790 -> MOVIMIENTO EN X: 545 MOVIMIENTO EN Y: 0 PULSADOR: 1
01:19:53.030 -> MOVIMIENTO EN X: 1023 MOVIMIENTO EN Y: 500 PULSADOR: 1
01:19:53.268 -> MOVIMIENTO EN X: 1023 MOVIMIENTO EN Y: 1023 PULSADOR: 1
01:19:53.544 -> MOVIMIENTO EN X: 519 MOVIMIENTO EN Y: 1023 PULSADOR: 1
01:19:53.783 -> MOVIMIENTO EN X: 0 MOVIMIENTO EN Y: 1023 PULSADOR: 1
01:19:54.021 -> MOVIMIENTO EN X: 0 MOVIMIENTO EN Y: 0 PULSADOR: 1
01:19:54.294 -> MOVIMIENTO EN X: 520 MOVIMIENTO EN Y: 0 PULSADOR: 1
01:19:54.533 -> MOVIMIENTO EN X: 1023 MOVIMIENTO EN Y: 317 PULSADOR: 1
01:19:54.776 -> MOVIMIENTO EN X: 1023 MOVIMIENTO EN Y: 1023 PULSADOR: 1
01:19:55.048 -> MOVIMIENTO EN X: 519 MOVIMIENTO EN Y: 1023 PULSADOR: 1
01:19:55.290 -> MOVIMIENTO EN X: 36 MOVIMIENTO EN Y: 1023 PULSADOR: 1
01:19:55.530 -> MOVIMIENTO EN X: 0 MOVIMIENTO EN Y: 499 PULSADOR: 1

```

Figura 2.29: Valores mediante ADC de arduino de 8 bits.



Figura 2.30: Opctoacoplador MCT6 fuente: <https://www.didacticaselectronicas.com/>.

de frecuencia los cuales van a las entradas digitales del mismo, Se utiliza esta referencia de optoacoplador ya que es fácil de encontrar en el comercio local y además tiene dos optoacopladores en el encapsulado tal como podemos ver en la Fig.2.31.

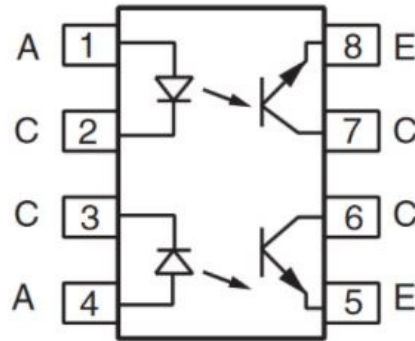


Figura 2.31: Encapsulado optoacoplador MTC6: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/53>

2.4.6. Regulador de tensión lm7805

El dispositivo tiene como función principal realizar una regulación del voltaje entre 24V a la entrada y obtener una salida de 5V, esta proporción se mantendrá siempre y cuando en la entrada se tenga como mínimo 7V según su hoja de datos. Con el fin de evitar los rizados de voltaje se le agregan dos capacitares de 100 microfaradio tanto en la entrada como en la salida del mismo.

2.4.7. Sensor de fuerza fsr 402

Este tipo de sensor posee un arreglo de resistencia variable sensible al tacto que permite que la misma cambie ante cualquier tipo de fuerza en la parte principal (denotado por la almohadilla negra Fig.2.33) permitiendo el uso como un sensor para lograr activar el freno del vehículo, el sensor permite una lectura análoga que para este caso está en un intervalo de 0 y 5V .

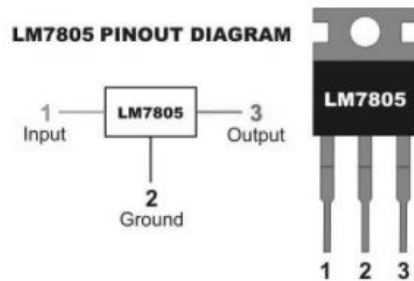


Figura 2.32: Regulador de tension LM7805 fuente: <https://www.hwlibre.com/lm7805/>.



Figura 2.33: Sensor de fuerza fsr 402 fuente: Mercado Libre

Para la correcta lectura del voltaje es necesario implementar la configuración mostrada en la Fig.2.34

Una vez teniendo esto, se procede a leer los voltajes promedio del microcontrolador Arduino para conocer su estado inactivo y la variación del voltaje del mismo, los valores medidos se muestran en la Fig. 2.35.

2.4.8. Proteus

Este software pertenece a LabCenter y se utilizó este programa con el fin de facilitar el diseño y la implementación de los códigos hechos, En este proyecto se usó la versión 8.10 con una licencia académica brindada por la universidad en el semestre 2020 ? 2.

La facilidad principal que presenta este software es que permite simular una gran variedad de microcontroladores, entre los cuales se encuentra el PIC18F4550 utilizado en el

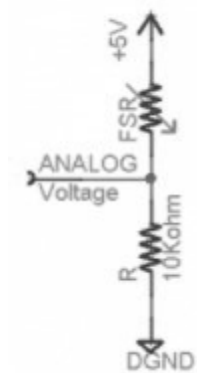


Figura 2.34: Conexión sensor de fuerza fsr 402

```

0
0
0
0
1
95
305
485
508
530
563
583
601
615
632
648
650
650
651
649
645
645
644
632
464
30
0
0
0
0
0
0
0
0
0

```

Figura 2.35: Valores analogos medidos

proyecto, además permite el diseño de la PCB de manera rápida y un visualizador 3D del proyecto creado.

2.4.9. MikroC Pro

Este software pertenece a la compañía MikroElektronika la cual es un fabricante de hardware y software y ponen a disposición este software, el cual fue utilizado en su versión Lite.

La ventaja encontrada en mismo radica en que tiene una gran cantidad de librerías y soporta la programación de diversos microcontroladores de varios fabricantes, se puede programar en C el cual es un lenguaje de alto nivel el cual permite la implementación de diversos tipos de algoritmos.

2.4.10. Diseño final

A continuación, se muestran las conexiones realizadas y periféricos usados de nuestro sistema de desarrollo basados en la Fig. 2.36 que corresponde a nuestro esquema electrónico realizado en Proteus.

Para ahorrar la mayor cantidad de espacio posible se decidió implementar el protocolo de comunicación I2C entre el PIC y la pantalla LCD ya que, aunque el PIC soportaba con facilidad los 16 pines usados en la LCD, al momento de diseñar la PCB (?Printed circuit board? de sus siglas en inglés) dichos canales interferían en la comunicación de otras conexiones y de haber sido llevado a cabo, el espacio requerido en la misma era muy grande. Para la implementación de dicho protocolo en el microcontrolador PIC se tuvo presente en gran medida las instrucciones dadas en <https://youtu.be/qKYxHJzyuXk> en el cual se hace uso de una plantilla de código abierto para implementar la comunicación I2C utilizando el software MikroC Pro.

La PCB final se muestra en la Fig.2.37

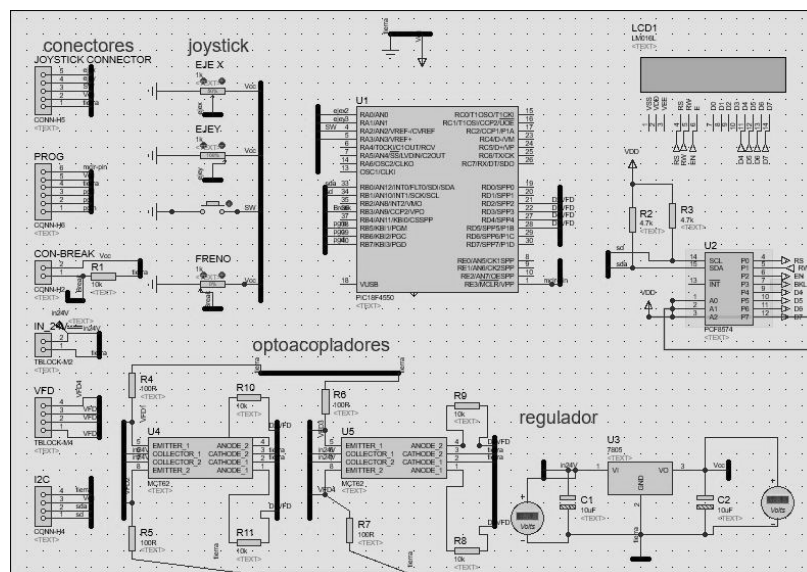


Figura 2.36: Esquema electrónico.

2.4.11. Algoritmo implementado

El algoritmo implementado se muestra la Fig.2.39. El algoritmo implementado se muestra la figura XX. El cual consiste en la implementación del ADC (?Analog to digital converter? Conversor análogo digital de sus siglas en ingles), el cual leía señales análogas y convertíamos a un valor digital con el fin de facilitar la implementación en el VFD.

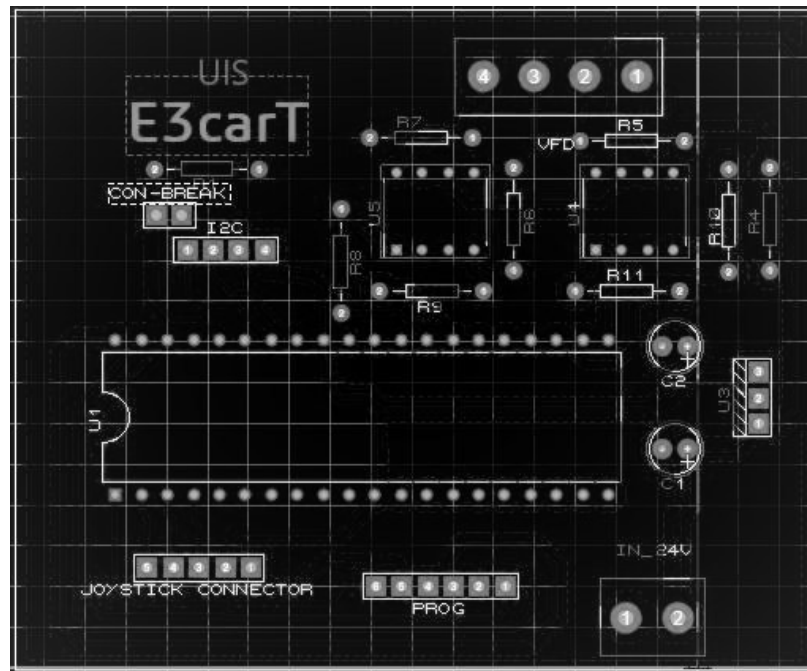


Figura 2.37: PCB.

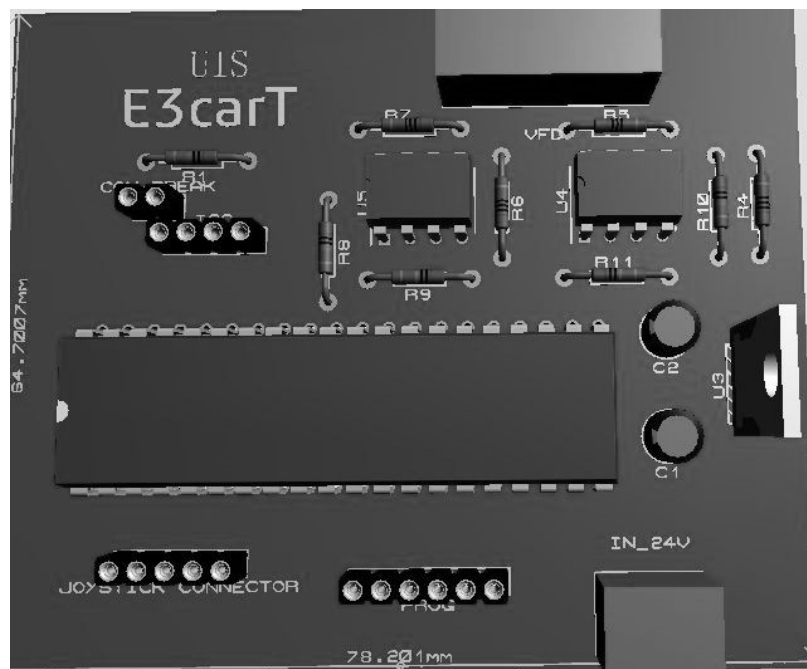


Figura 2.38: PCB 3D.

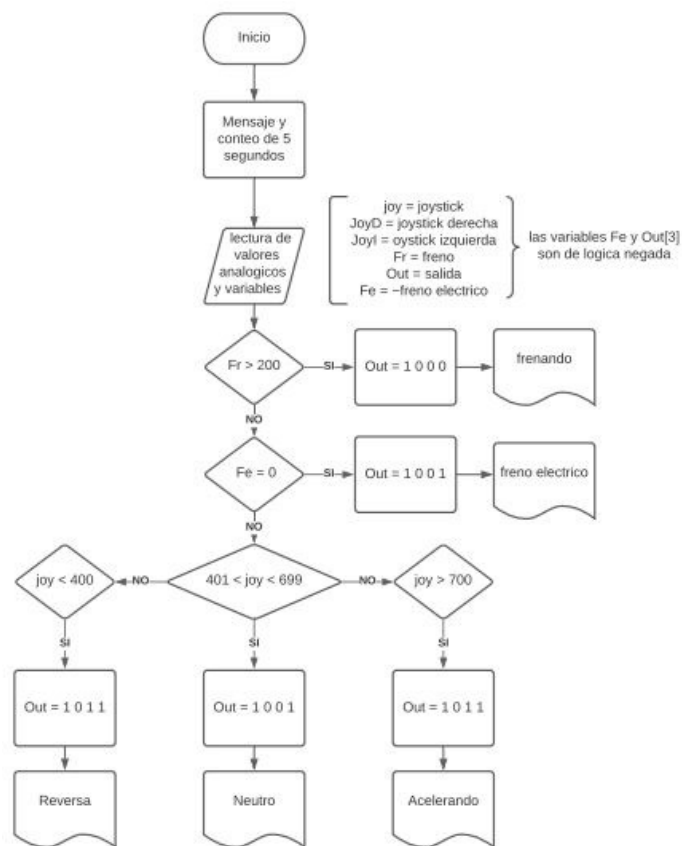


Figura 2.39: Algoritmo.

2.4.12. Ensamble en el vehículo

Se realizó el debido cableado y se decidió por facilidad que la PCB fuese instalado en el volante junto al comando joystick y la pantalla led LCD, el sensor de fuerza se puso en el pedal de freno derecho.

Para fijar la PCB se implementó un acrílico ajo-enchape blanco cortado a laser para el perfecto ensamblaje de las piezas y a su vez el acrílico se fijó con amarres al volante, el montaje final se muestra en la Fig.2.40 .

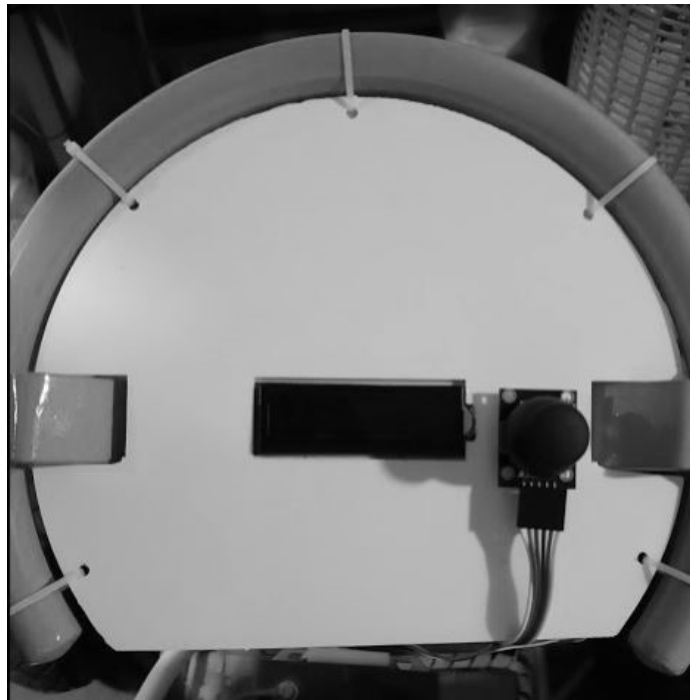


Figura 2.40: Parte frontal del volante.

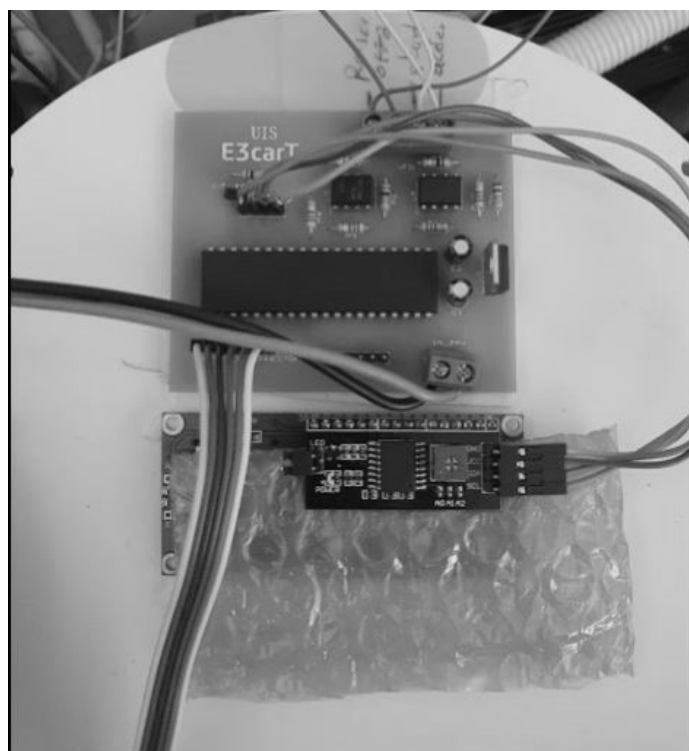


Figura 2.41: Parte trasera del volante.

2.4.13. Configuración VFD

Inicialmente, se realizó una *puesta en marcha rápida*, que requirió la configuración de los parámetros P0100 al P0311, los cuales corresponden a los valores de placa del motor, como potencia, tensión y corriente nominales. Además de configurar las funtes de señales de mando para las entradas digitales a través del parámetro P0700 en el valor 2. Esta y las siguientes configuraciones de parámetros se realizaron a través del panel básico de operador (BOP en inglés), que consiste en botones de navegación de menús y una pantalla led. Para el control del motor, se utilizaron todas las entradas digitales disponibles (de la 1 a la 4), cada una pudiendo ejecutar funciones predefinidas en una lista de valores de los parámetros P0701 al P0704. Así, la configuración fue como sigue:

- Entrada 1, función ON/OFF1 ($P0701 = 1$): Para que al recibir una señal alta, pusiera en operación el variador, y al retirarse esta señal, realizara un frenado eléctrico en rampa con tiempo desde velocidad máxima hasta reposo definido en el parámetro P1121 (se escogieron 10 s).
- Entrada 2, función JOG Izquierda ($P0702 = 11$): al recibir una señal alta, el motor iniciara el giro hacia la izquierda en modo JOG, permitiendo arrancar el motor desde cualquier velocidad. Según como el motor se acopló a la transmisión, el giro hacia la izquierda implica movimiento hacia adelante del carro. El tiempo que toma al motor acelerar en rampa desde reposo hasta máxima velocidad, definida por frecuencia en el parámetro P1059 (escogidos 60 Hz) se define en el parámetro P1061 (en 30 s como se definió inicialmente).
- Entrada 3, función JOG derecha ($P0703 = 10$): de manera análoga, al recibir una señal alta, el motor girará en modo JOG hacia la derecha, equivalente a la reversa. Lo hará desde el reposo hasta la velocidad definida en P1058 (30 Hz, pues la reversa no se realizará tan rápido) en el tiempo definido en P1060 (10 s).
- Entrada 4, función OFF2 ($P0704 = 3$): para que al recibir una señal baja, el variador realice un frenado en rodadura libre, permitiendo el uso libre de los frenos mecánicos sin sobrecargar el motor.

Sin embargo, por razones que aún desconocemos, el modo JOG se deshabilitó al conectar la PCB (inicialmente se trabajó con 4 switches sencillos), luego las entradas 2 y 3 se trabajaron con frecuencias fijas ($P0702 = 15$ y $P0703 = 16$), definidas en los parámetros P1001 (en -60 Hz para el avance) y P1002 (en 30 Hz para la reversa) respectivamente. el tiempo que el motor tarda para cada frecuencia fija se definió en los parámetros P1121 (30 s) y P1120 (10 s) respectivamente. Esto dificultó significativamente el control de velocidad ON-OFF que se tenía pensado para el vehículo, pues las frecuencias fijas obligan al vehículo a estar en total reposo para reiniciar la marcha.

HASTA AQUÍ VOY CON LA REVISIÓN.....

Tabla 2.6: Tiempo de carga de la batería

hora	Voltage [V]
0	12 [V]
1	12.5 [V]
2	13 [V]
3	13.1 [V]
4	13.6 [V]
5	13.6 [V]
6	13.6 [V]

Bibliografía

- [1] *Estrategia nacional de movilidad eléctrica*, Memoria de trabajos de difusión científica y técnica, REPÚBLICA DE COLOMBIA, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; Ministerio de Minas y Energía; Ministerio de Transporte; Unidad de Planeación Minero Energética - UPME, Bogotá D.C, 2019.
- [2] MA Abdel-Halim and AF Almarshoud, *Optimization of the performance of a grid-connected induction generator*, Journal of King Abdulaziz University **25** (2014), no. 1, 33.
- [3] Siemens AG, *Sinamics s120 function manual drive functions*, url<https://support.industry.siemens.com/>, 2009-2021.
- [4] P. S. AGUIRRE, D. S. HIDALGO, J. A. PANAMÁ, J. D. PADILLA, and D. F. VEINTEMILLA, *Diseño de un vehículo eléctrico prototipo monoplaza para una persona parapléjica y construcción de su chasis*, Trabajo de grado (Ingeniero en Mecánica Automotriz), Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2014.
- [5] J. F. AMAYA and F. A. RUEDA, *Análisis y simulación de e-bikes empleando representación macroscópica energética: casos de estudio*, Trabajo de grado (Ingeniero Electricista), Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, Bucaramanga, Colombia, 2019.
- [6] B. A. ARDILA and Y. J. OCHOA, *Ubicación óptima de una estación de recarga pública para vehículos eléctricos en una red de distribución de energía eléctrica*, Trabajo de grado (Ingeniero Electricista), Universidad Industrial de Santander. Facultad de

Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, Bucaramanga, Colombia, 2018.

- [7] Jonathan Ariza and Heyson Ramos, *An educational experience with PBL in capstone projects: The case of EOLO a Colombian electric vehicle with sustainable energy systems*, 2019 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE), 2019, pp. 1–9.
- [8] J. P. Arévalo, R. D. Ortíz, E. N. Gama, O. L. Ramos, and J. Duque, *Diseño e implementación de un prototipo de vehículo solar con almacenamiento de energía*, Revista científica **18** (2014), no. 1, 159–165.
- [9] Varios Autores, *Air - density, specific weight and thermal expansion coefficient at varying temperature and constant pressures*, url<https://www.engineeringtoolbox.com/air-density-specific-weight-d600.html>, 2003.
- [10] Marshall Batteries, *Marshall batteries. .are "deep cycle" batteries constructed differently*, url<https://www.marshallbatteries.com.au/battery-faq/>, 2019.
- [11] Rolls Battery, *Rolls battery engineering*, url<https://www.rollsbattery.com/resources/>, 2021.
- [12] CambioEnergetico.com, *Baterías solares, toda la información*, url<https://youtu.be/sq58ZT1OnbQ>, 2016.
- [13] Sylveste Campbell, *Solid-state ac motor controls: Selection and application*, CRC Press, 2020.
- [14] E. Carreño, E. A. Vacca, and I. Lugo, *Diseño y fabricación de un vehículo autónomo impulsado por energía solar*, Tecnura **16** (2012), no. 32, 91–106.
- [15] D. A. CASTRO and J. S. PEÑA, *Diseño y construcción de un prototipo experimental de vehículo eléctrico autobalanceado unipersonal veau*, Trabajo de grado (Ingeniero Mecánico), Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, Bucaramanga, Colombia, 2011.
- [16] Clarios, *How to choose your battery*, url<https://www.autobatteries.com/en-us/how-to-choose-your-car-battery-replacement/compare-deep-cycle-vs-starting-batteries>, 2021.

- [17] E. R. CORONADO, J. J. NAVARRETE, and A. OVALLE, *Diseño y construcción de un vehículo biplaza tipo Buggy para uso recreativo*, Trabajo de grado (Ingeniero Mecánico), Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, Bucaramanga, Colombia, 2015.
- [18] D. E. CUESTA and N. CALLEJAS, *Diseño y montaje del sistema de tracción eléctrica de un vagón*, Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico), Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, Bucaramanga, Colombia, 2019.
- [19] Gobierno de Colombia, *Ley 1964 de junio 11 de 2019: Mediante la cual se promueve el uso de vehículos eléctricos en Colombia*, Ley de la República 1964, Bogotá D.C, 2019.
- [20] Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, Stefano Longo, and Kambiz Ebrahimi, *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles*, CRC press, 2018.
- [21] General Electric, *Ac motor selection and application guide*, NEMA Standards Publication, 1993.
- [22] Enertik, *Diferencias entre baterías de ciclo profundo y arranque, qué ventajas tienen? - preguntas frecuentes*, [urlhttps://www.youtube.com/watch?v=R1suAQLzdRIab](https://www.youtube.com/watch?v=R1suAQLzdRIab)_{channel = Enertik}, 2020.
- [23] A. Filippone, *Data base, drag*, [urlhttps://web.archive.org/web/20070715171817/http://aerodyn.org/D1999-2004](https://web.archive.org/web/20070715171817/http://aerodyn.org/D1999-2004).
- [24] Anurag Goney, *Computational analysis of drag forces on car profiles*.
- [25] Cummins Inc, *Encuentre la diferencia: tecnología eléctrica de ión de litio versus baterías de ácido de plomo*, [urlhttps://www.cummins.com/es/news/2019/06/17/spot-difference-lithium-ion-versus-lead-acid-battery-electric-technology](https://www.cummins.com/es/news/2019/06/17/spot-difference-lithium-ion-versus-lead-acid-battery-electric-technology), 2021.
- [26] R. Loisel, G. Pasaoglu, and C. Thiel, *Large-scale deployment of electric vehicles in Germany by 2030: An analysis of grid-to-vehicle and vehicle-to-grid concepts*, Energy Policy **65** (2014), 432–443.

- [27] C. MARTÍN and R. MOCHOLÍ, *Diseño y optimización del chasis de un vehículo eléctrico autónomo*, Trabajo de grado (Ingeniería en Tecnologías Industriales), Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria de Projectes i de la Construcció, Barcelona, España, 2016.
- [28] G. Masiero, M. H. Ogasavara, A. Conde, and M. L. Risso, *Electric vehicles in China: BYD strategies and government subsidies*, RAI Revista de Administração e Inovação **13** (2016), no. 1, 3–11.
- [29] MHA Mohd Fakharuzi, SMH Syed Omar, Thomas Arthur Ward, Ow Chee Sheng, Suhadiyana Hanapi, and Khairul Imran Sainan, *Design and testing of inertia dynamometer for prototype fuel cell electric vehicle*, (2014).
- [30] J. Quiros-Tortos, L. Victor-Gallardo, and L. Ochoa, *Electric vehicles in Latin America: slowly but surely toward a clean transport*, IEEE Electrification Magazine **7** (2019), no. 2, 22–32.
- [31] A. R. RAMOS and F. SOTO, *Propuesta del prototipo de un vehículo eléctrico sustentable*, Trabajo de grado (Ingeniero Electricista), Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Ciudad de México, México, 2013.
- [32] AG Siemens, *Convertidor sinamics v20*, Cache. industry. siemens. com (2013).
- [33] A. Soltani-Sobh, K. Heaslip, A. Stevanovic, R. Bosworth, and D. Radivojevic, *Analysis of the electric vehicles adoption over the United States*, Transportation Research Procedia **22** (2017), 203–212.