

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**Diseño del chasis, dirección y sistema de propulsión eléctrica para un vehículo
de la categoría prototipo enfocado en la competencia Shell Eco Marathon
2020**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DEL GRADO
DE BACHILLER EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA
MECATRÓNICA**

Autor:
TARAZONA SÁENZ, Diego Marcio

Asesor:
CATAÑO SANCHEZ, Miguel Ángel

Co-Asesor:
DOMINGUEZ MOSTACERO, Daniel Eduardo

San Miguel, 16 de marzo del 2021

RESUMEN

Shell Eco-marathon es una competencia patrocinada por Shell de eficiencia energética, la marca de hidrocarburos organiza la competencia anualmente en tres ediciones principales por continente, una en Asia, otra en Europa y finalmente, en América. Los equipos que logren mayor eficiencia o, en pocas palabras, recorrer más con menos energía, son los que logran ganar las competencias o establecer récords de eficiencia.

La competencia permite dos tipos de vehículos, los *Prototype*, que son vehículos que llevan generalmente 3 ruedas; y los *Urban Concept*, vehículos de 4 ruedas que tienen características similares a los autos convencionales. La motorización de estos vehículos depende de la fuente de energía, los cuales pueden ser gasolina, Diesel o etanol para motores de combustión interna; batería eléctrica o pilas de combustible de hidrógeno para motores eléctricos.

La gran eficiencia lograda por vehículos de combustión interna en este tipo de competencias es alta, logrando récords como en 2004 por el equipo de Lycée La Joliverie (Francia), logrando 3410 km por litro de combustible. No obstante, estos vehículos que tienen alta eficiencia siguen emitiendo gases de efecto invernadero, por lo que la competencia comenzó a ponerle más énfasis en los prototipos eléctricos. En el año 2019, durante la competencia en el autódromo de Sonoma en California, el vehículo eléctrico de la Universidad de Illinois en la categoría UrbanConcept logró 244.62 km por kilovatio hora.

En la Pontificia Universidad Católica del Perú, el grupo estudiantil SEMA PUCP ha participado en 2 ocasiones, 2017 y 2018, con un vehículo prototipo de motor a combustión interna.

En esta ocasión, el presente trabajo de investigación plantea el diseño de un vehículo para que el grupo Newro, grupo nuevo en la PUCP, pueda competir en Shell Eco Marathon en la categoría prototipo eléctrico.



© 2021, Diego Marcio Tarazona Sáenz

Se autoriza la reproducción total o parcial,
Con fines académicos a través de cualquier
Medio o procedimiento, incluyendo la cita
Bibliográfica del documento.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	2
INTRODUCCIÓN.....	10
1.1. PROBLEMÁTICA	10
2. ANTECEDENTES Y ESTADO DE LA TECNOLOGÍA.....	17
2.1. ANTECEDENTES	17
2.2. MARCO TEÓRICO	21
2.2.1. ARQUITECTURA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS	21
2.2.2. DINÁMICA DEL SISTEMA DE DIRECCIÓN	25
2.2.3. MECANISMO DE CUATRO BARRAS	26
2.2.4. OPERACIÓN Y CONTROL DE MOTORES BRUSHLESS DC.....	28
2.2.5. FUERZAS PRESENTES EN EL VEHÍCULO	30
2.3. DOMINIO MECÁNICO.....	33
2.3.1. TRIMOTOS ELÉCTRICAS COMERCIALES.....	33
2.3.2. VEHÍCULOS PROTOTIPO Y CONCEPTO URBANO DE LA COMPETENCIA	35
2.3.3. SISTEMAS DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA.....	42
2.4. DOMINIO ELÉCTRICO-ELECTRÓNICO.....	44
2.4.1. CATÁLOGO COMERCIAL	44
2.5. DOMINIO DE CONTROL.....	53
2.5.1. CATÁLOGO COMERCIAL	53
2.6. OBJETIVOS Y ALCANCE.....	58
2.6.1. OBJETIVO GENERAL.....	58
2.6.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	58
2.6.3. ALCANCE.....	58
3. DISEÑO CONCEPTUAL.....	59
3.1. LISTA DE EXIGENCIAS	59
3.2. FUNCIÓN TOTAL O ABSTRACCIÓN (BLACKBOX).....	60

3.3.	FUNCIONES PARCIALES O PROCESOS TÉCNICOS.....	61
3.4.	ESTRUCTURA DE FUNCIONES POR DOMINIO.....	63
3.4.1.	DOMINIO MECÁNICO	63
3.4.2.	DOMINIO ELÉCTRICO-ELECTRÓNICO.....	64
3.4.3.	DOMINIO DE CONTROL.....	66
3.4.4.	ESTRUCTURA DE FUNCIONES INTEGRADA.....	66
3.5.	CONCEPTOS DE SOLUCIÓN INTEGRADOS.....	67
3.5.1.	CONCEPTO DE SOLUCIÓN 1	67
3.5.2.	CONCEPTO DE SOLUCIÓN 2	69
3.5.3.	CONCEPTO DE SOLUCIÓN 3	71
3.6.	ANÁLISIS TÉCNICO – ECONÓMICO.....	73
4.	DISEÑO PREMILINAR.....	76
4.1.	PROYECTO PRELIMINAR	77
4.2.	ARQUITECTURA DE HARDWARE.....	78
	CONCLUSIONES.....	80
	RECOMENDACIONES.....	81
	ANEXOS	82
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Introducción:

Figura 1.1: Distribución de emisiones de dióxido de carbono desde 1980 hasta 1999	12
Figura 1.2: Crecimiento de ventas mundiales en automóviles eléctricos e híbridos	14
Figura 1.3: Crecimiento de ventas de automóviles eléctricos e híbridos en el Perú.....	15

Antecedentes y estado de la tecnología:

Figura 2.1. (a) Vehículo eléctrico del fabricante Lohner, (b) Vehículo eléctrico comercializado por Fritchle a principios del siglo XX.....	18
Figura 2. 2. (a) Ford Model T, el primer automóvil en fabricarse en masa, (b) Conversión a eléctrico de un Renault Daulphine.....	19
Figura 2. 3. (a) EV1, primer vehículo eléctrico desarrollado y puesto en venta por General Motors, (b) Tesla Model S, vehículo eléctrico insignia de la marca.	20
Figura 2.4. Arquitectura de los vehículos eléctricos actuales.	22
Figura 2. 5. Posibles configuraciones de Vehículos Eléctricos	23
Figura 2.6: Vehículo con dirección delantera y ángulos de giro internos y externos.	25
Figura 2. 7: Mecanismo trapezoidal de dirección y mecanismo con ruedas inclinadas.	27
Figura 2.8: Diagrama de mecanismo de cuatro barras con variables	27
Figura 2.9: Arquitectura de los motores brushless de imanes permanentes.	29
Figura 2.10: Forma de onda de motores PM BLAC y BLDC.	30
Figura 2.11. DCL de un vehículo parqueado en un pavimento horizontal.	31
Figura 2.12. Esquema para el cálculo de velocidad de derrape y de vuelco.....	32
Figura 2.13: Trimoto eléctrica de la marca Ecoenergy en la zona amazónica	34
Figura 2.14: Trimoto Tossa Passenger-6H	34
Figura 2.15: (a)Trimoto eléctrica E1 3.0 de Smart Cargo, (b)Chasis de la trimoto con el motor en la parte posterior.	35
Figura 2.16. Equipo Eco Illini, ganadores de la competencia 2020 en Sonoma, California.	36
Figura 2.17. Equipo Milhagem UFMG, subcampeones de la competencia de 2020 en Sonoma, California.	36
Figura 2.18. (a) Prototipo eléctrico de la universidad de Qatar año 2014, (b) Diseño en CAD del prototipo presentado en la misma competencia, (c) Diseño de la parte posterior entre la llanta	

motriz, el motor y el chasis posterior, (d) Chasis de la parte delantera con perfiles de aluminio más pequeños.....	37
Figura 2.19. (a) UrbanConcept de la Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología (2017) (b) Diseño de la polea para la faja síncrona que forma parte de la transmisión, (c) Diseño de suspensión trasera del vehículo, con el motor Brushless y la transmisión.	38
Figura 2.20. (a) Concepto Urbano del Politécnico de Milán llamado Daphne (2011), (b) Diseño del sistema de suspensión, (c) Diseño del sistema de transmisión con el motor DC Brushless. ..	40
Figura 2.21. (a) Parte posterior del vehículo prototipo, (b) Segundo vehículo prototipo de la Pontificia Universidad Católica del Perú (2018), (c) Transmisión CVT, (d) Motor Honda GX100.	41
Figura 2.22. Ubicación del BMS en el sistema de control.....	47
Figura 2.23. Encoder rotativo incremental magnético.....	52
Figura 2.24. Botón de emergencia.....	53
 Diseño conceptual:	
Figura 3.1. Blackbox del sistema completo.....	60
Figura 3.2. Concepto de solución 1 generalizado, chasis metálico y componentes electrónicos. 68	
Figura 3.3. Concepto de solución 1, sistema de dirección.....	69
Figura 3. 4. Concepto de solución 2 generalizado, chasis metálico y componentes electrónicos. 70	
Figura 3.5. Concepto de solución 1 generalizado, chasis metálico y sistema de dirección.....	71
Figura 3.6. Concepto de solución 3 generalizado, chasis metálico y componentes electrónicos. 72	
Figura 3.7. Concepto de solución 3 generalizado, chasis metálico y sistema de dirección.....	73
 Diseño preliminar:	
Figura 4.1. Proyecto preliminar diseñado con software CAD Inventor.	78
Figura 4.2. Arquitectura de hardware de los componentes del sistema de propulsión eléctrica del vehículo.....	79

ÍNDICE DE TABLAS

Antecedentes y estado de la tecnología:

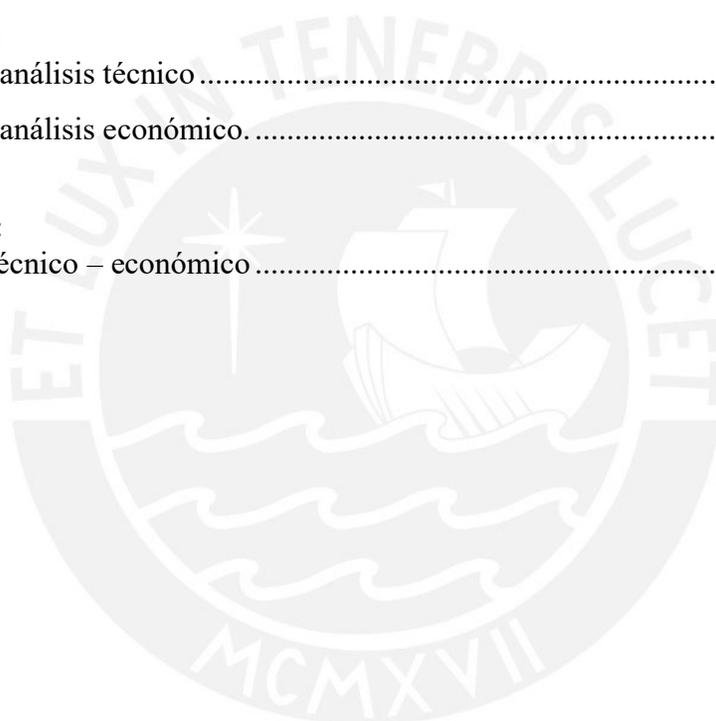
Tabla 2.1. Características de los diferentes sistemas de transmisión de potencia.	42
Tabla 2.2. Tabla de los diferentes tipos de motores presente en la industria.....	44
Tabla 2.3. Variables medidas por el BMS (Battery Managment System).....	46
Tabla 2.4. Diferentes tipos de baterías presentas en la industria.	48
Tabla 2.5. Diferentes tipos de microcontroladores presentes en la industria.....	54
Tabla 2. 6. Drivers comerciales para el control de motores Brushless.	57

Diseño conceptual:

Tabla 3.1. Tabla de análisis técnico.....	74
Tabla 3.2. Tabla de análisis económico.....	75

Diseño preliminar:

Tabla 4.1. Gráfico técnico – económico.....	76
---	----



LISTA DE SIMBOLOS

- $g = 9.81 \text{ m/s}^2 =$ Gravedad
- $l =$ Distancia entre ejes
- $w =$ Distancia entre ejes de dirección
- $d_{ruedas} =$ Ancho de vía
- $f =$ Distancia entre el eje de dirección y el centro de la rueda
- $a =$ Distancia de la biela MA
- $b =$ Distancia de la biela AB
- $c =$ Distancia de la biela BP
- $d =$ Distancia de la biela imaginaria MP
- $e =$ Distancia del cateto vertical de la biela MP
- $h =$ Distancia del cateto horizontal de la biela MP
- $\alpha =$ Ángulo de la placa triangular o bieleta
- $\beta =$ Ángulo entre el plano vertical de la rueda y la biela MA
- $\theta_2 =$ Ángulo entre el plano horizontal de las ruedas y la biela MA
- $\theta_3 =$ Ángulo entre el plano horizontal de las ruedas y la biela AB
- $\theta_4 =$ Ángulo entre el plano horizontal de las ruedas y la biela BP
- $\theta'_2 =$ Ángulo entre el plano horizontal de las ruedas y la biela DN
- $\theta'_3 =$ Ángulo entre el plano horizontal de las ruedas y la biela CD
- $\theta'_4 =$ Ángulo entre el plano horizontal de las ruedas y la biela PC
- $\delta_o =$ Ángulo de dirección de la rueda exterior
- $\delta_i =$ Ángulo de dirección de la rueda interior

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Problemática

El clima de la tierra siempre ha estado en constante cambio, desde hace miles de millones de años que viene cambiando como consecuencia del desbalance energético. Entre los cambios más notables están los periodos de glaciación, el más reciente acabó hace unos 10 000 años, por lo que nos encontramos en un periodo interglaciar. Este último es un ejemplo del cambio climático como consecuencia natural de la tierra, pero también este cambio se está acelerando debido a la acción del hombre.

El efecto invernadero se refiere a la retención de la radiación térmica emitida por el sol en la atmósfera de la tierra, gracias a una espesa capa de gases, que luego irradian este calor en todas las direcciones. Gracias a este fenómeno, la vida se pudo desarrollar como la conocemos ahora, evitando que la tierra llegue a ser lo suficientemente fría. Este efecto está formado por gases como el Vapor de agua (H_2O), Metano (CH_4), Óxido de nitrógeno (N_2O), Ozono (O_3), Clorofluorocarbonos (CFC) y Dióxido de carbono (CO_2) principalmente. Este último gas suele quedarse entre 5 y 200 años en la atmósfera, contribuyendo a retener el calor en esta zona.

El aumento de la industrialización provocó un aumento del 30% de la concentración de estos gases desde el siglo pasado, lo cual ha provocado que la temperatura del planeta se intensifique progresivamente, a diferencia de siglos pasados, en el cual la naturaleza se encargaba de equilibrar las emisiones de estos gases. Este aumento de los gases podría provocar graves problemas ambientales como la deforestación, escasez de agua, contaminación, entre otros¹.

Según la OMS, los países que menos contribuyeron a aumentar las emisiones de gases de invernadero serán primeros y más afectados del cambio climático. Por ende, serían más propensos a que su gente sufra de malnutrición, debido al aumento general de la temperatura, lo que provocaría sequías, peores tormentas, etc. En especial, el aumento de la temperatura podría generar muertes en diversas partes del planeta. Además, este calentamiento global ha traído como consecuencias el deshielo en los glaciares, aumento del nivel del mar, cambio de los ecosistemas, como el que ocurrió en el Mar de Aral, Asia central, el cual redujo el 90% de su tamaño original debido a la mala gestión de estos recursos por parte de la antigua URSS y la evaporación de sus aguas restantes².

Sin ir muy lejos, en el océano del pacífico ocurre el fenómeno del niño, causado por el calentamiento de los mares, que durante las fechas de otoño en invierno son frías. Este calentamiento llega a las costas sudamericanas por el mes de marzo, lo cual genera un cambio en el ecosistema lo que provoca más lluvias, muertes de especies que no sobreviven al cambio de temperatura, periodos más húmedos, baja presión atmosférica³. El efecto del niño podría incrementarse en mayor temperatura en el mar o mayor duración de los eventos naturales del niño, según un estudio realizado por el Dr. Ken Takahashi Guevara, Presidente Ejecutivo de SENAMHI, junto a otros científicos internacionales⁴.

Entonces, debido al incremento de los gases de efecto invernadero se tiene como causa el incremento del calentamiento global, entre esos gases se encuentra el Dióxido de carbono (CO₂)

¹ Extraído de <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/que-es-el-cambio-climatico-y-como-nos-afecta/>

² Extraído de <https://www.geografiainfinita.com/2016/05/la-historia-mas-triste-de-todos-los-mares-aral/>

³ Extraído de <https://rpp.pe/peru/actualidad/todo-sobre-el-fenomeno-el-nino-noticia-828384>

⁴ Extraído de: <https://www.senamhi.gob.pe/?&p=prensa&n=886>

el cual es generado por los sectores de transporte, el sector comercial, el residencial y el industrial (Figura 1.1).

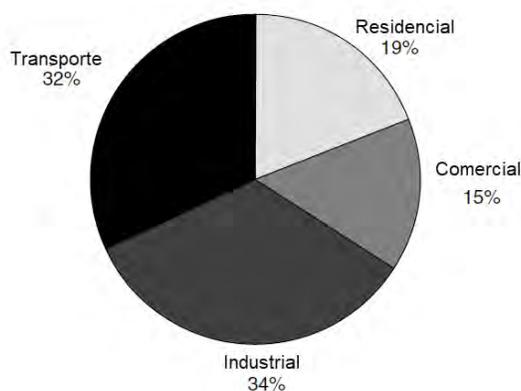


Figura 1.1: Distribución de emisiones de dióxido de carbono desde 1980 hasta 1999
Fuente: Extraído de (Ehsani et al., 2009)

Se observa en la Figura 1.1, el sector Industrial es el que genera más emisiones, debido a que las fábricas continúan utilizando energía de combustibles fósiles, en vez de energías renovables. En paralelo, el sector de transporte también genera un buen porcentaje de las emisiones totales (32%) producto de la combustión de combustibles fósiles, como: la gasolina, gas natural o diésel. La realidad es que los vehículos a combustión son un gran avance tecnológico, han ayudado a satisfacer la necesidad de transporte desde su creación en 1860 con el vehículo a gasolina desarrollado por Etienne Lenoir, contribuyendo al crecimiento de la sociedad moderna. Sin embargo, este tipo de vehículos emiten hidrocarburos al tener el motor funcionando, tales como el monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y dióxido de carbono, este último representa el 80% de las emisiones totales.

El aumento de automóviles a nivel mundial ha generado el incremento de emisiones de dióxido de carbono, lo que conlleva a que aumente la contaminación, el calentamiento global y la degradación lenta del planeta. En ese sentido, una manera de disminuir la contaminación es reducir el uso de vehículos a combustión; es decir, cambiarlos por otros medios de transportes más sencillos y que no contaminan, como las bicicletas o patines. También, promover el uso compartido de vehículos con otras personas ayuda a que más gente se traslade en menor cantidad de autos, de modo que se emiten menos cantidad de contaminación, como el uso del transporte público.

En contraste con los vehículos de combustión interna, los vehículos eléctricos podrían tener una huella de carbono 18 % menor. La firma alemana Volkswagen realizó un estudio sobre las emisiones de un modelo Golf a Diesel y uno eléctrico durante una vida útil del coche de 200 000 kilómetros. Durante su fabricación, el vehículo a Diesel tiene una huella de carbono de 29 gCO₂/km, menor que la del eléctrico que es 57 gCO₂/km, esto debido a que principalmente se gasta más energía en la extracción de materia prima, como las baterías de Litio. No obstante, durante el uso, el vehículo a Diesel puede emitir 111 gCO₂/km, mientras que el eléctrico puede emitir 62 gCO₂/km, lo cual resulta una gran reducción en las emisiones de ambos vehículos. Además, al unir las emisiones totales durante su fabricación y uso, el vehículo a Diesel emite 140 gCO₂/km, mientras que el eléctrico 119 gCO₂/km; si se considera el uso de energías renovables durante la fase de uso del eléctrico, la huella de carbono podría disminuir hasta 2 gCO₂/km, teniendo un total de 64 gCO₂/km, mucho menos de la mitad de lo que emitiría su homólogo en Diesel⁵.

Debido al creciente aumento del calentamiento global y a las ventajas respecto a las bajas emisiones, los vehículos eléctricos suelen tener menor cantidad de impuestos y más facilidades de compras que los tradicionales a combustión, por lo que la gente opta cada vez más en comprar autos eléctricos e híbridos. En el mundo han aumentado las ventas de vehículos eléctricos e híbridos, siendo China, Estados Unidos y el continente europeo los lugares que registran mayores ventas en los últimos años. Solo en 2015 se habían vendido 565,000 vehículos eléctricos e híbridos, en el año 2018 alcanzaron los 2,1 millones de unidades.

⁵ Extraído de <https://www.ecoticias.com/motor/193577/coche-electrico-tiene-huella-carbono-18-menos-combustion>

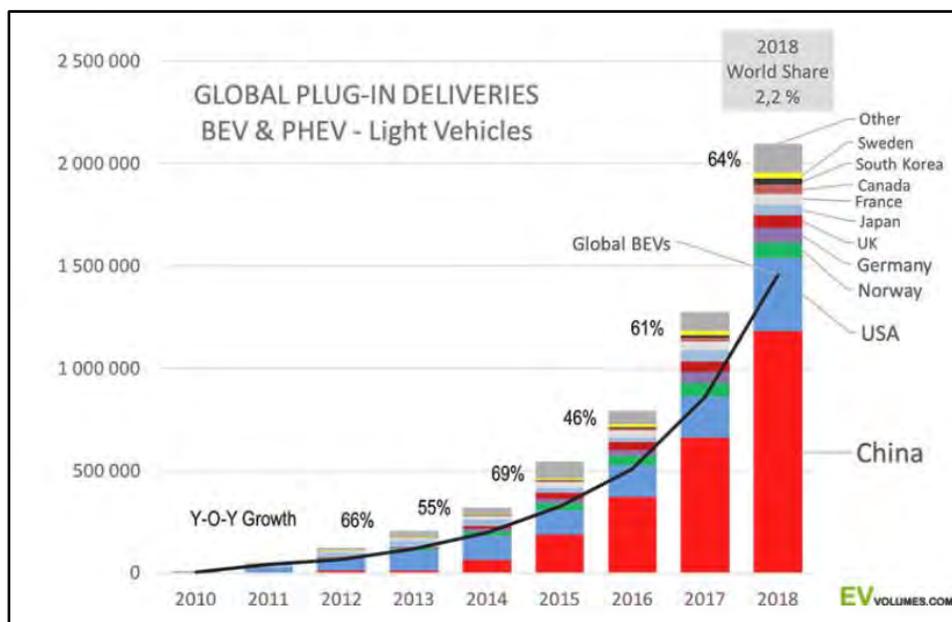


Figura 1.2: Crecimiento de ventas mundiales en automóviles eléctricos e híbridos
Fuente: EV-Volumes⁶

Esta tendencia de uso de vehículos eléctricos se ve reflejada más en países desarrollados, los cuales tienen mejor infraestructura como mayor cantidad de electrolineras esparcidas en diferentes puntos del país o aranceles bajos para incentivar la importación y compra de este tipo de vehículos. En el caso peruano, el Poder Ejecutivo publicó, en junio de 2019, un decreto supremo en el que modificó el Impuesto Selectivo al Consumo (ISC)⁷ en el que se aumentó a 40% el impuesto para la importación de vehículos eléctricos e híbridos usados, pero se disminuyó a 0% para vehículos nuevos; por lo que se espera que esta tendencia de compra de este tipo de vehículos siga en crecimiento. Durante el año 2019 se vendieron 366 vehículos entre HEV, PHEV y BEV (Hybrid Electric Vehicle, Plug-in Hybrid Electric Vehicle y Battery Electric Vehicle respectivamente), en lo que va del año 2020, la pandemia del Covid-19 y el confinamiento obligatorio hizo que no hubiese ventas durante los meses de Abril y Mayo, sin embargo, totalizando las ventas de estos vehículos hasta el mes de Agosto, se ha alcanzado 301 vehículos vendidos y se espera que esta cifra super a la del año antecesor antes del mes de diciembre.

⁶ Extraído de <http://www.ev-volumes.com/country/total-world-plug-in-vehicle-volumes/>

⁷ Extraído de <https://www.mef.gob.pe/es/noticias/notas-de-prensa-y-comunicados?id=6055>

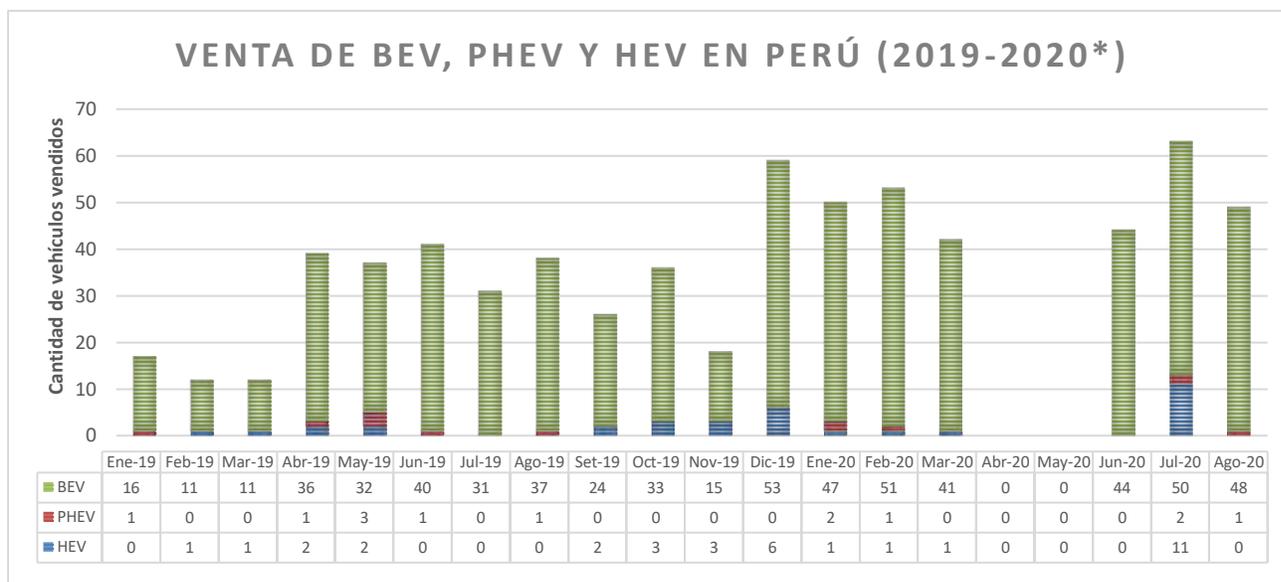


Figura 1.3: Crecimiento de ventas de automóviles eléctricos e híbridos en el Perú

Fuente: AAP (Asociación Automotriz del Perú)⁸

Debido a la problemática mencionada anteriormente, la empresa anglo-neerlandesa de hidrocarburos, Shell, lanzó la competencia Shell Eco-marathon, la cual busca que estudiantes de colegios o universidades construyan prototipos de vehículos que puedan recorrer más distancia con poca cantidad de combustible, es decir, mayor eficiencia energética, con el objetivo que puedan contribuir con nueva tecnología para el desarrollo de vehículos más eficientes que no dañen mucho al medio ambiente.

La competencia permite dos tipos de vehículos, los prototipos, que son vehículos que llevan generalmente 3 ruedas; y los UrbanConcept, vehículos de 4 ruedas que tienen características similares a los autos convencionales. La motorización de estos vehículos depende de la fuente de energía, los cuales pueden ser gasolina, Diesel o etanol para motores de combustión interna; batería eléctrica o pilas de combustible de hidrógeno para motores eléctricos.

⁸ Extraído de: <https://aap.org.pe/informes-estadisticos/agosto-2020/Informe-Agosto-2020.pdf>

La Pontificia Universidad Católica del Perú ha participado 2 veces con el grupo estudiantil SEMA PUCP (Shell Eco Marathon Américas) con un vehículo prototipo de motor a combustión interna durante los años 2017 y 2018.

La presente tesis se enfoca en el diseño del chasis y sistema de dirección de acuerdo con las reglas para un vehículo categoría prototipo, además del diseño del sistema de propulsión eléctrica, así como el sistema de telemetría e interfaz de usuario, con el propósito de que este vehículo pueda competir en la edición 2021 de Shell Eco Marathon con el grupo Newro.



CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES Y ESTADO DE LA TECNOLOGÍA

2.1. Antecedentes

El primer coche eléctrico data de 1834, creado por Thomas Davenport, el cual operaba en una pista corta, circular y electrificada. Pero fue hasta 1852 que comenzó la comercialización de los coches eléctricos, aunque estos no usaban baterías recargables; ya que durante ese año Gaston Planté inventó la batería recargable de plomo y ácido, mas no era posible su fabricación a nivel industrial. Recién en 1880, Camille Faure inventó un procedimiento electroquímico llamado masa activa que aumentaba la capacidad de la batería inventada por Planté; luego de ese invento de Canille, se comenzó a fabricar a nivel industrial las baterías de plomo y ácido, por lo que los vehículos eléctricos recargables comenzaron a ser una realidad a principios del siglo XX.

Durante 1890, el fabricante austriaco de carruajes Jacob Lohner convirtió su empresa en fabricante de automóviles, tanto como eléctricos como de combustión, por lo que contó con el trabajo de Ferdinand Porsche para crear el Egger-Lohner P1, un coche eléctrico muy parecido a un carruaje, pero con tracción delantera, podía alcanzar los 34 km/h y recorrer hasta 79 km con una carga. Este vehículo fue todo un éxito para la marca, lo que implicó que se fabricaran más modelos eléctricos como híbridos.

Además del auge de Lohner en Europa, el líder del mercado de vehículos eléctricos era Fritchle, empresa fundada por Oliver Fritchle, que comenzó arreglando baterías, pero luego comenzó a mejorar estas y a crear sus propios vehículos. De ese modo, en 1906 la empresa vendió su primer coche, el “One Hundred Mile Fritchle”, el cual podría recorrer hasta 100 millas (160 km) en llano tras una recargar su batería toda una noche. Este vehículo fue diseñado pensando en las damas de la alta sociedad, las cuales pensaban que los vehículos eléctricos eran más limpios y hacían menos ruidos que los de combustión; por ende, se convirtió en un coche de lujo para la época, costando el equivalente a 105 mil dólares actuales, a comparación de un Ford de la época que podía costar 14 mil dólares.



Figura 2.1. (a) Vehículo eléctrico del fabricante Lohner, (b) Vehículo eléctrico comercializado por Fritchle a principios del siglo XX.

Fuente: Extraído de Motorpasión (Murias, 2010)

Ya para 1900 se tenían fabricados 4192 vehículos en Estados Unidos, de los cuales el 28% eran eléctricos. Además, en Boston, Chicago o Nueva York los vehículos eléctricos representaban un tercio del parque automotriz, inclusive, la flota de taxis de Nueva York se componía principalmente de coches eléctricos. Sin embargo, en 1908, el Model T de Ford cambió todo el panorama. La fabricación en serie de este modelo permitió bajar el precio de venta de forma notable, además que Charles Kettering inventó el motor de arranque eléctrico, lo cual mejoró el confort del uso de coches a gasolina. Adicionando a ello que ya para la década de los años 20, los vehículos a gasolina superaban notablemente la autonomía de los eléctricos y eran más asequibles. Adicionalmente, en Estados Unidos, luego de la Primera Guerra Mundial se tenían mejores

carreteras, por lo que había una gran necesidad de movilidad de la gente, además, el precio de la gasolina bajó drásticamente tras descubrir petróleo en Texas, lo cual terminó por imponer al coche de gasolina contra el eléctrico.

Los siguientes 100 años y hasta inicios del siglo XXI continuaría con un dominio del coche con motor a combustión, pero hubieron contadas veces en las que algunos fabricantes quisieron regresar a los vehículos eléctricos. Durante los años 60, empresas como Henney Motor Company de Nueva York o Electric Fuel Propulsion Corp. de Michigan intentaron volver a lo eléctrico mediante conversiones de coches convencionales, como por ejemplo el Renault Dauphine o Renault 10, en coches eléctricos, añadiéndoles un pack de baterías y el motor eléctrico. El gran maletero delantero de estos vehículos permitía alojar las baterías (de plomo-cobalto) y, ya que el motor estaba en el eje posterior, se permitía un buen equilibrio de pesos, por lo que estos vehículos eran ideales para su conversión, además que una carga completa les daba una autonomía entre 70 y 120 millas.



Figura 2. 2. (a) Ford Model T, el primer automóvil en fabricarse en masa, (b) Conversión a eléctrico de un Renault Dauphine.

Fuente: Extraído de Motorpasión (Murias, 2010)

Recién en los años 90 los vehículos eléctricos vuelven a empezar a tomar protagonismo, fue durante ese año que el estado de California adopta la norma “Zero Emission Vehicle (ZEV)” que imponía que para 1998 al menos el 2% de las ventas en California de algún gran fabricante debían realizarse con coches de cero emisiones hasta llegar al 10% en 2003. Dado que ningún fabricante iba a poder cumplir esa norma como tal debido a las limitaciones tecnológicas, la norma fue cambiando para incluir a los coches híbridos e híbridos enchufables.

Fue entonces en 1996 que el primero de los grandes fabricantes en atreverse a comercializar vehículos eléctricos sería General Motors con el EV1. La venta de este vehículo solo se daba para clientes en California, Arizona y Georgia mediante concesionarios y comenzó en 1996 hasta 2003, vendiendo 1.117 unidades. La cancelación de ventas del EV1 se debe más a temas de la dirección de General Motor, dado que el vehículo no fue un fracaso total: tubo una autonomía de 160 km, cifras adelantadas para su época.

Ya en 2003 comienzan los primeros movimientos para desarrollar la empresa estadounidense Tesla, no es hasta 2006 que lanzan el Tesla Roadster, el primer coche eléctrico de la marca. Basado en la carrocería del Lotus Elise, logra una autonomía superior a los 300 km con una potencia de 250 CV. En el año 2012, Tesla lanza el Model S, con una batería de 100 kWh, convirtiéndolo en el automóvil eléctrico de serie con mayor autonomía, la cual es de 539 km.

Debido a los problemas con el cambio climático generados por el aumento de emisiones de gases de invernadero, diversos organismos apoyaron la movilidad eléctrica. Por ejemplo, la Unión Europea acordó que los fabricantes deben lograr la media de 95 g/km de CO₂ para 2021, para lo cual no les queda otra opción que hacer lo más eficientemente posible el motor de combustión interna o apostar por la electrificación de sus vehículos. Debido a que hacer lo más eficiente posible el motor a gasolina es algo que ni si quiera Mazda, con su motor Skyactiv-X está cerca de lograrlo, lo más viable es desarrollar más vehículos eléctricos, híbridos e híbridos enchufables.



Figura 2. 3. (a) EV1, primer vehículo eléctrico desarrollado y puesto en venta por General Motors, (b) Tesla Model S, vehículo eléctrico insignia de la marca.

Fuente: Extraído de *Motorpasión* (Murias, 2010) y *ComputerHoy*.

2.2. Marco Teórico

2.2.1. Arquitectura de vehículos eléctricos

Antiguamente, los primeros vehículos eléctricos contaban con el motor eléctrico conectado a una transmisión mecánica y el paquete de baterías. Estos vehículos tenían un rendimiento inferior al de los vehículos a combustión interna, debido a limitaciones tecnológicas de la época.

Actualmente, los vehículos eléctricos permiten una arquitectura más amplia y una mayor flexibilidad en la propulsión eléctrica, permitiendo diversos tipos de motores de inducción para ello.

El tren de transmisión eléctrico moderno consta de 3 subsistemas principales: propulsión eléctrica, fuente de energía y auxiliares. El subsistema de propulsión eléctrica consta del motor eléctrico, el cual recibe energía del circuito convertidor de potencia eléctrica, este circuito recibe las señales del controlador del vehículo, el cual sería el cerebro de todo el auto. En paralelo, el motor entrega potencia mecánica al sistema de transmisión, el cual se encarga de repartirlo a las ruedas motrices. El subsistema de fuente de energía está comprendido principalmente por la fuente de energía (el cual puede ser batería, celdas de hidrogeno, etc.), esta fuente está controlada por el sistema de gestión de energía; por último, la unidad de reabastecimiento de energía se encarga de transformar la energía eléctrica de la red a una que sirva para cargar la batería, esta unidad también está controlada por el sistema de gestión de energía. Finalmente, el subsistema auxiliar está compuesto por la unidad de dirección asistida, el cual es un apoyo al conductor para reducir el esfuerzo al girar el volante; además del control del aire acondicionado. Estos dos últimos se energizan por la fuente de alimentación auxiliar.

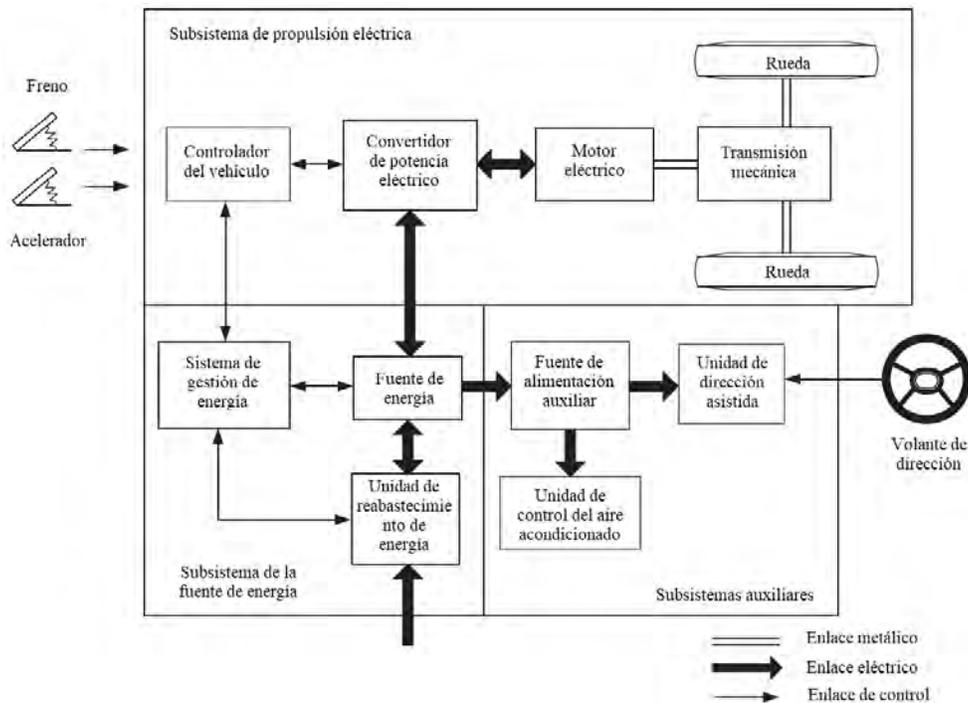
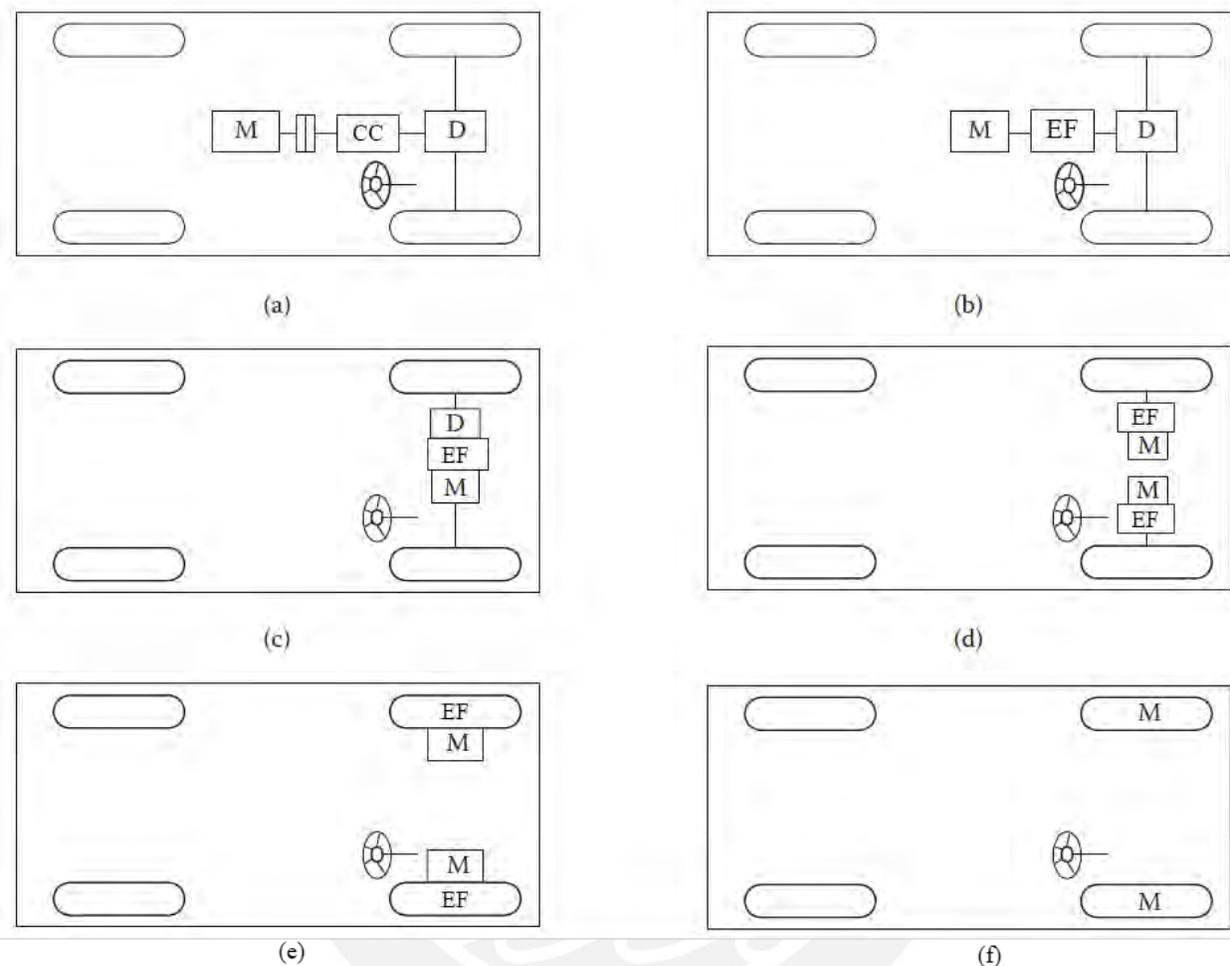


Figura 2.4. Arquitectura de los vehículos eléctricos actuales.
Fuente: Extraído y traducido de (Ehsani et al., 2009).

El freno y acelerador son señales de control de entrada al sistema, el controlador del vehículo se encarga de leer esas señales y mandar señales de salida al convertidor de potencia eléctrica, el cual funciona regulando el flujo de energía del motor eléctrico y de la fuente de energía. La energía eléctrica también puede ir en flujo inverso, cargando la batería mediante el frenado regenerativo, en este caso, esta recuperación es controlada por la unidad de gestión de batería y el controlador. Además, la fuente de alimentación auxiliar proporciona la potencia necesaria a diferentes niveles de voltaje para los sistemas auxiliares.

Hay una variedad de posibles configuraciones de vehículos eléctricos como los mostrados en la Figura 2.5.



E: Embrague

M: Motor eléctrico

CC: Caja de cambios

D: Diferencial

EF: Engranaje fijo

Figura 2. 5. Posibles configuraciones de Vehículos Eléctricos

Fuente: Extraído y traducido de (Ehsani et al., 2009).

- a. Esta configuración reemplaza al motor de combustión interna por el eléctrico mediante el tren de transmisión convencional. Consiste en un motor eléctrico, un embrague, una caja de cambios y un diferencial. El embrague y caja de cambios puede ser reemplazado por

una transmisión automática. El embrague se usa para conectar o desconectar la potencia del motor eléctrico de las ruedas motrices. La caja de cambios proporciona un conjunto de relaciones de transmisión para modificar el perfil de velocidad-potencia (par). El diferencial es un dispositivo mecánico (generalmente de engranajes planetarios) que permite que las ruedas de ambos lados sean conducidas a diferentes velocidades cuando se toma una curva.

- b. Con un motor eléctrico que tiene alta eficiencia en un amplio rango de velocidad, se puede eliminar el embrague y reemplazar la caja de cambios por una sola relación de velocidad representada por un engranaje fijo. Esta configuración no solo reduce el tamaño y peso de la transmisión mecánica, también simplifica el control del tren de transmisión.
- c. Es muy similar al tren de transmisión en (b) pero se simplifica y se compacta más. El motor eléctrico, el engranaje fijo y el diferencial pueden integrarse más aún en un solo conjunto mientras ambos ejes apuntan en ambas ruedas motrices.
- d. Se reemplaza el diferencial mecánico usando dos motores en cada rueda, acoplados a un engranaje fijo de una sola relación de velocidad. Ambas ruedas delanteras son motrices y operan a una velocidad diferente al tomar una curva.
- e. Para simplificar más el tren de transmisión, el motor se puede colocar dentro de la llanta, esta disposición del motor es llamada *in-wheel drive* (tracción en la rueda). Se suele usar un conjunto de engranajes planetarios delgados que se emplean para reducir la velocidad del motor y mejorar el torque. El juego de engranajes planetarios ofrece la ventaja de una gran relación de reducción a alta velocidad con una alineación del eje de entrada y de salida.
- f. Se abandona por completo cualquier engranaje entre el motor eléctrico y la rueda motriz. El control de velocidad del motor es equivalente al control de velocidad de la rueda y, por lo tanto, de la velocidad del vehículo. Sin embargo, esta disposición requiere que el motor eléctrico tenga un torque más alto, para poder arrancar y acelerar el vehículo.

2.2.2. Dinámica del sistema de dirección

Para maniobrar un vehículo se requiere un mecanismo de dirección confiable y eficiente; existen varios tipos de dirección, como los de piñón-cremallera o los de tornillo sin fin, sin embargo, por más complejos que sean unos y más simples otros, todos tienen el mismo fin, cumplir la condición de Ackerman. Esta condición cinemática expresa que cuando el vehículo gira en torno a un centro de rotación O (considerando para la demostración las ruedas delanteras como directrices), tanto la rueda directriz interior como la exterior deben formar los ángulos δ_i y δ_o respectivamente, los cuales deben converger en el mismo centro de rotación O , esta condición se expresa por la siguiente ecuación:

$$\cot(\delta_o) - \cot(\delta_i) = \frac{w}{l}$$

Donde w viene a ser la distancia entre las ruedas de directrices y se lo conoce como ancho de vía o *track*, l vendría a ser la distancia entre el eje delantero y el eje trasero y se lo conoce como distancia entre ejes o *wheelbase*.

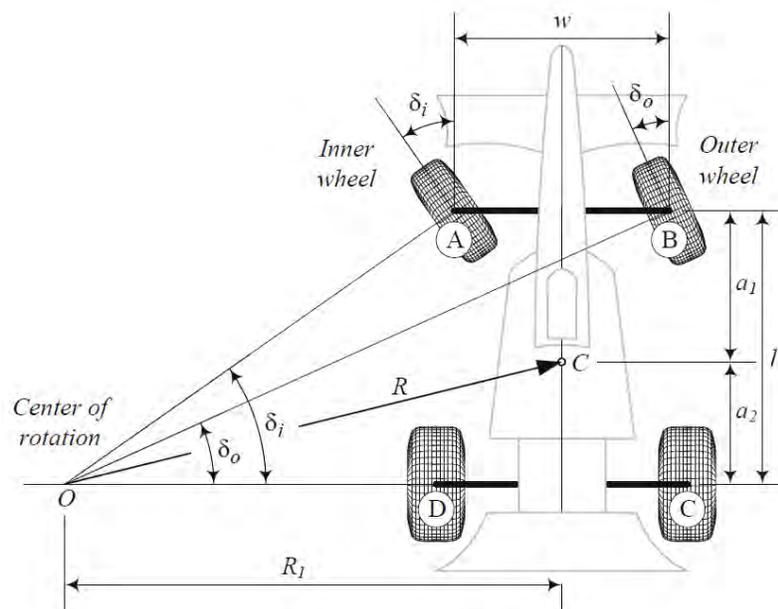


Figura 2.6: Vehículo con dirección delantera y ángulos de giro internos y externos.
Fuente: Extraído de (Jazar, 2014)

Según la Figura 2.6, C vendría a ser el centro de masa del vehículo y R el radio de giro de este, para calcular el radio de giro se utiliza la siguiente ecuación:

$$R = \sqrt{a_2^2 + l^2 \cot^2 \delta}$$

Donde δ es el promedio de los ángulos interior y exterior, expresado por la siguiente ecuación:

$$\cot \delta = \frac{\cot(\delta_o) + \cot(\delta_i)}{2}$$

Por otro lado, la condición de Ackerman es necesaria a bajas velocidades y cuando el ángulo de deslizamiento es cercano a cero. En esas condiciones mencionadas, las fuerzas laterales y centrífugas son despreciables y el vehículo puede girar con seguridad solo aplicando la condición de Ackerman. Un dispositivo que proporcione la dirección de acuerdo con esta condición se lo conoce como dirección de Ackerman, mecanismo de Ackerman o geometría de Ackerman. Además, es bueno resaltar que no existe un mecanismo práctico de dirección con varillaje de cuatro barras que pueda proporcionar la geometría de Ackerman a la perfección; sin embargo, se puede diseñar un mecanismo de múltiples barras para acercarse lo más posible a esta condición y ser exactos en algunos ángulos de giro.

2.2.3. Mecanismo de cuatro barras

El mecanismo simétrico de cuatro barras ha sido utilizado por más de 100 años como mecanismo de dirección, este mecanismo tiene dos parámetros característicos, el ángulo β o y el brazo inclinado l . En la Figura 2.7 se puede ver el sistema con las ruedas rectas y también cuando las ruedas giran, donde aparecen ya los ángulos directrices internos y externos.

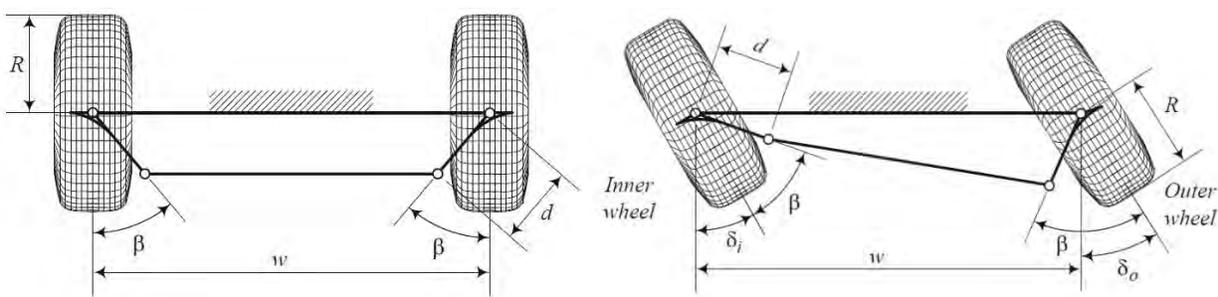


Figura 2. 7: Mecanismo trapezoidal de dirección y mecanismo con ruedas inclinadas.
Fuente: Extraído de (Jazar, 2014)

Para realizar el análisis cinemático del mecanismo, se considera que se cumple la ley de Grashof, es decir $a + d \leq c + b$, con lo que se puede determinar la posición, velocidad y aceleración de todo el mecanismo. A cada barra de la Figura 2.8 se le asignó una variable y un ángulo respectivo,

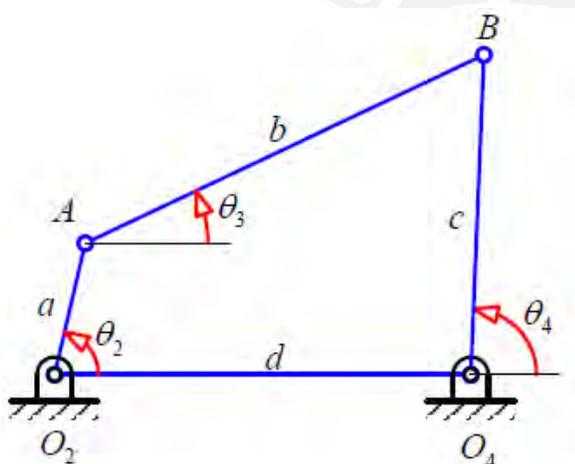


Figura 2.8: Diagrama de mecanismo de cuatro barras con variables

Fuente: Extraído de (Rodríguez Hernández & Hermoza

Llanos, n.d.)

asumiendo que el mecanismo se mueve en sentido antihorario, las ecuaciones que describen su movimiento son las siguientes:

$$a \cos \theta_2 + b \cos \theta_3 - c \cos \theta_4 - d = 0$$

$$a \sin \theta_2 + b \sin \theta_3 - c \sin \theta_4 = 0$$

Acomodando las variables y reemplazándolas con las siguientes expresiones:

$$k_1 = \frac{d}{a} ; k_2 = \frac{d}{c} ; k_3 = \frac{a^2 - b^2 + c^2 + d^2}{2ac}$$

Se puede obtener la siguiente ecuación cuadrática, donde los valores A , B y C son los siguientes:

$$A \tan^2 \frac{\theta_4}{2} + B \tan \frac{\theta_4}{2} + C = 0$$

Donde A, B y C tienen los siguientes valores:

$$A = \cos \theta_2 - k_1 - k_2 \cos \theta_2 + k_3$$

$$B = 2 \cos \theta_2$$

$$C = k_1 - (k_2 + 1) \cos \theta_2 + k_3$$

De este modo se puede obtener el valor de θ_4 en función de θ_2 , dado que es una ecuación cuadrática la solución, existe 2 tipos de soluciones, cuando el diferencial es igual a cero y mayor que cero, significa que θ_4 tiene dos raíces reales, cuando el diferencial es menor a cero, las raíces de θ_4 son complejas conjugadas, lo que quiere decir que la longitud de las barras no pueden estar unidas con el ángulo escogido θ_2 . Por otro lado, cuando la solución son dos raíces reales, ocurre el caso que cuando es con el signo menos, la configuración del mecanismo es abierta, cuando es con el signo positivo es de configuración cerrada.

$$\theta_{4,2} = 2 \arctan \left(\frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \right)$$

2.2.4. Operación y control de motores Brushless DC

Los motores Brushless de imanes permanentes pertenecen a la familia de motores Síncronos sin conmutador, dentro de esta familia también pertenecen los motores de reluctancia variable y los de rotor bobinado. Esta categoría de motores se caracteriza por que suelen tener el rotor externo y están compuestos de imanes permanentes, los cuales suelen ser de neodimio debido a su gran potencia. Existen dos tipos de motores brushless de imanes permanentes en esta familia, los PM BLAC (Permanent Magnet BrushLess AC) y los PM BLDC (Permanent Magnet BrushLess DC). Ambos tienen una arquitectura similar, tienen sensores de efecto Hall junto al rotor del motor, dado que el rotor es de imanes permanentes, estos sensores funcionan bien para detectar cuando una bobina energizada del estator alcanza magnéticamente al polo opuesto de uno de los imanes del rotor, de esta manera se puede energizar otra bobina adyacente para seguir una secuencia de giro, gracias al sensor es que se le puede enviar todos estos pulsos al controlador, el cual se encargará de armar la secuencia de disparo de los semiconductores del inversor, este inversor está alimentado directamente a las baterías que energizarán el motor. Además, el controlador recibirá

órdenes del exterior como las que pueden provenir de un acelerador, el cual emite una señal para aumentar o disminuir la velocidad del motor, el controlador traduce esa señal para conmutar los semiconductores del inversor más rápido o lento (variar la frecuencia) y es el sensor quien le da la secuencia de qué conmutadores abrir o cerrar dependiendo de la posición en la que se encuentre el estator sobre el rotor.

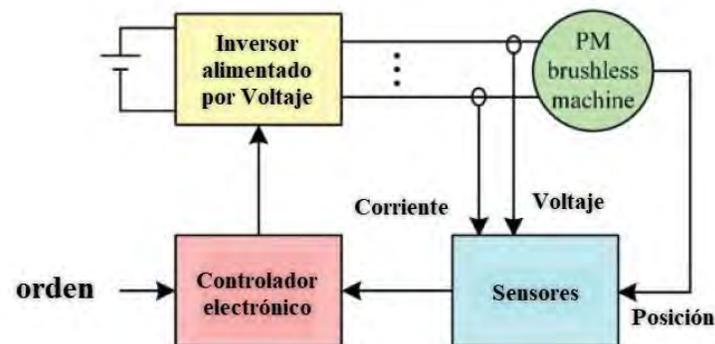
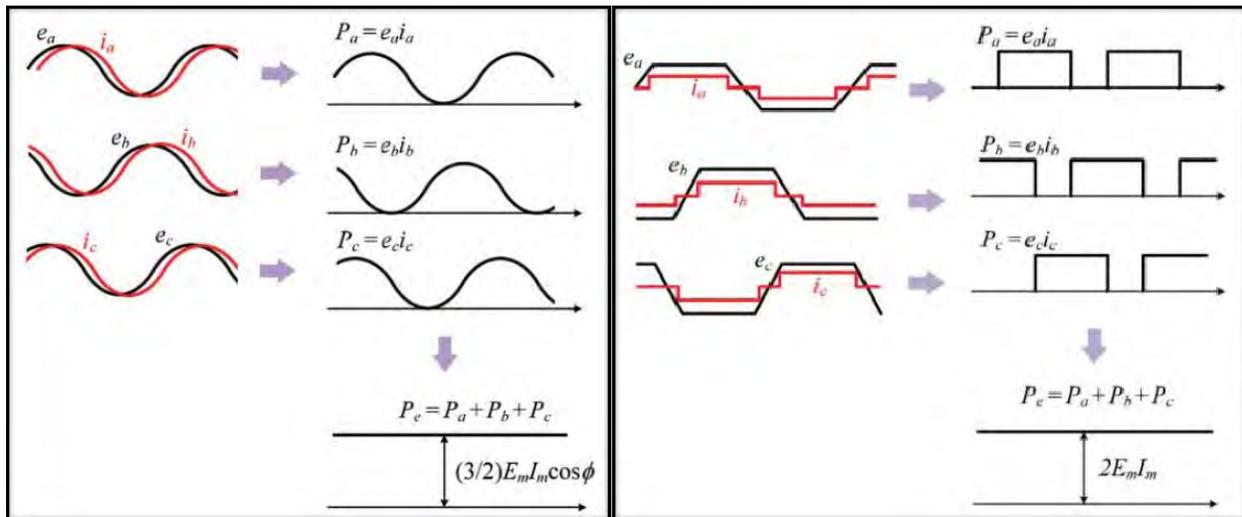


Figura 2.9: Arquitectura de los motores brushless de imanes permanentes.
Fuente: Extraído de (Chau, 2015)

La forma de onda de trabajo del motor PM BLAC es similar al de un motor trifásico asíncrono AC, son ondas sinusoidales separadas 120° eléctricos, el cambio de velocidad se puede obtener variando la frecuencia de conmutación de los semiconductores del inversor. Por otro lado, la forma de la onda de trabajo del motor PM BLDC es trapezoidal con zonas superiores planas, las ondas también están separadas 120° eléctricos. Según la Figura 2.10, para ambos tipos de motores sometidos a valores nominales de voltaje inducido E_m y a valores de corriente nominales I_p se obtiene una fórmula de potencia para el motor PM BLAC igual a $P_e = (3/2)E_m I_m \cos \phi$ y para el caso del motor PM BLDC igual a $P_e = 2E_m I_m$, donde para valores iguales de voltaje y corriente, el motor DC logra desarrollar un 33% más de potencia que el AC, además que el motor DC Brushless puede ofrecer un 15% más de densidad de potencia que el AC, lo cual indica que en un mismo tamaño, el motor DC puede ofrecer más potencia que lo que podría ofrecer un motor AC.



(a). Onda Sinusoidal de un PM BLAC

(b). Onda Trapezoidal de un PM BLDC

Figura 2.10: Forma de onda de motores PM BLAC y BLDC.
Fuente: Extraído de (Chau, 2015)

2.2.5. Fuerzas presentes en el vehículo

Para poder modelar los elementos del vehículo a la resistencia es necesario saber qué fuerzas actúan en este, tanto cuando el vehículo está en reposo como cuando está en movimiento. Para el reposo se puede considerar la fuerza de reacción producida por el peso, y en movimiento, la fuerza centrífuga aparece cuando el vehículo toma una curva. También es necesario conocer la velocidad límite de vuelco y la velocidad límite de derrape, velocidades importantes al momento de calcular la fuerza centrífuga.

- Fuerza por el peso

En este caso, se considerará el caso en el que el vehículo está parqueado en un pavimento horizontal, de esta forma podremos conocer el comportamiento estático del vehículo en reposo. Comenzando con la fuerza del peso, esta es la fuerza generada por la masa del vehículo (m), la cual genera dos fuerzas de reacción, F_{z_1} en las ruedas delanteras y F_{z_2} en las traseras. Además, es necesario conocer el centroide del vehículo, denominado con C según la Figura 2.11.

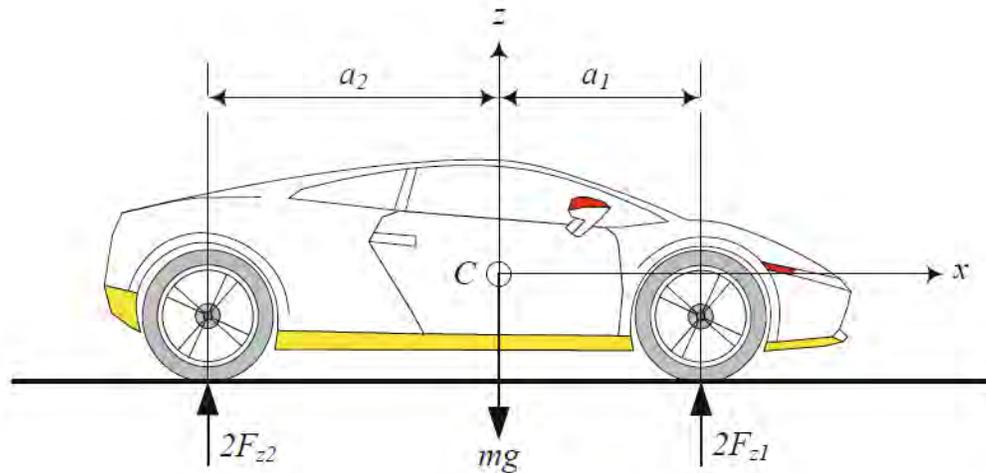


Figura 2.11. DCL de un vehículo parqueado en un pavimento horizontal.
Fuente: Extraído de (Jazar, 2014)

Producto de este DCL, se pueden tener las siguientes fórmulas para las fuerzas de reacción:

$$F_{z_1} = \frac{1}{2} mg \frac{a_2}{l} \quad (2.1)$$

$$F_{z_2} = \frac{1}{2} mg \frac{a_1}{l} \quad (2.2)$$

- Fuerza centrífuga

Esta fuerza es la causa que más influye sobre la deriva o desviación direccional en las curvas. Es de componente normal al movimiento y aplicada al centro de gravedad del automóvil. Depende de la masa (m), de la velocidad de giro (v) y del radio de la curva (R). Siendo F_c la fuerza centrífuga:

$$F_c = \frac{mv^2}{R} \quad (2.3)$$

- Velocidad límite de derrape y vuelco

En una trayectoria curva, la fuerza centrífuga actúa sobre el centro de gravedad, denotada con la letra G , a una altura h sobre el piso. Esta fuerza generada debe ser contrarrestado por los neumáticos, además de generarse un momento de vuelco. Para aproximar primero esta velocidad se considera que el vehículo cuenta con suspensión rígida, además de suponer que la calzada tiene un peralte con ángulo ζ respecto de la horizontal.

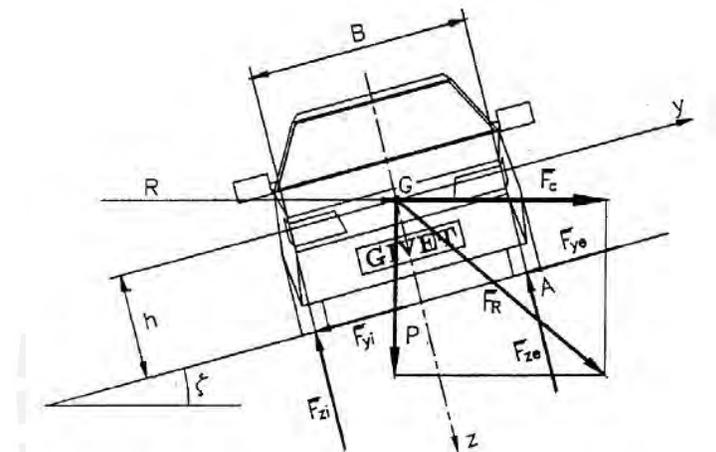


Figura 2.12. Esquema para el cálculo de velocidad de derrape y de vuelco.
Fuente: Extraído de (Aparicio, Vera, & Díaz, 2001)

B = Vía o ancho del vehículo

R = Radio de la trayectoria del vehículo

G = Centro de gravedad del vehículo

h = Altura del centro de gravedad del vehículo

F_c = Fuerza centrífuga

P = Peso

F_{zb} F_{ze} = Fuerzas normales a la superficie de rodadura

F_{yb} F_{ye} = Fuerzas laterales

μ = Coeficiente de adherencia entre neumático – piso

La velocidad límite de derrape:

$$v_{ld} = \sqrt{\frac{gR(\mu_{y_{max}} + \tan \zeta)}{(1 - \mu_{y_{max}} \tan \zeta)}} \quad (2.4)$$

La velocidad límite de vuelco:

$$v_{lv} = \sqrt{\frac{gR(B/2h + \tan \zeta)}{(1 - B/2h \tan \zeta)}} \quad (2.5)$$

2.3. Dominio Mecánico

En el presente capítulo, se presentarán trimotos eléctricas, así como vehículos prototipos que hayan participado en la competencia Shell Eco-marathon.

2.3.1. Trimotos eléctricas comerciales

- Trimoto de Ecoenergy

La empresa Ecoenergy S.A.C. desarrolló las primeras trimotos eléctricas en Pucallpa con ayuda del estado en el programa Innóvate. Ecoenergy adaptó el chasis del mototaxi de la empresa China de trimotos KYTO. Además, en colaboración con la empresa de motores GEMmotors, adaptan en Perú todo de modo que se tenga una trimoto eléctrica. Estos vehículos tienen una autonomía aproximada de más de 130 km por carga, además de que tiene un sistema de carga con energía solar, lo cual lo convierte en una alternativa eco-sostenible para el transporte, el gran problema es el costo de producción muy elevado en comparación con sus similares de motor a combustión interna, por lo que es más viable el alquiler de estos vehículos.



Figura 2.13: Trimoto eléctrica de la marca Ecoenergy en la zona amazónica
Fuente: Extraído de http://ecoenergysac.com/?page_id=29&lang=es

- Trimoto Tossa Passenger-6H

La empresa china Tossa tiene en venta la trimoto eléctrica Passenger-6H, este vehículo es de tiene un motor DC Brushless acoplado a un diferencial que da tracción a las llantas traseras, el motor es de 1000W, y tiene baterías de plomo y ácido que dan 12V a 45A-h para lograr una velocidad máxima de 40 km/h con una autonomía de 70 a 100 km. El peso del vehículo en vacío es de 385 kg, lo cual es muy similar al peso de una moto Bajaj Torito; además, el tiempo total de carga del vehículo es de 6 a 8 horas



Figura 2.14: Trimoto Tossa Passenger-6H
Fuente: Extraído de https://www.alibaba.com/product-detail/Factory-sales-close-electric-tricycle-for_60477184930.html

- TriMóvil E1 3.0 Full de Smart Cargo

La empresa chilena Smart Cargo tiene en venta la trimoto eléctrica TriMóvil E1 3.0 Full, este vehículo es de tiene un motor DC Brushless acoplado a un diferencial que da tracción a las llantas traseras. El motor es de 3000W, y tiene baterías de GEL que dan 60V a 45A-h para lograr una velocidad máxima de 60 km/h con una autonomía de 100 a 200 km. El tiempo total de carga del vehículo es de 6 a 8 horas.



Figura 2.15: (a) Trimoto eléctrica E1 3.0 de Smart Cargo, (b) Chasis de la trimoto con el motor en la parte posterior.

Fuente: Extraído de <https://www.smartcargo.cl/trimoto-e1.html>

2.3.2. Vehículos prototipo y concepto urbano de la competencia

- Prototipo eléctrico de Eco Illini (University of Illinois)

Eco Illini es el grupo de estudiantes de la universidad de Illinois que desarrolló el vehículo completamente eléctrico ganador de la categoría prototipo en la competencia Shell Eco-marathon 2020. Con una autonomía de 244 km/kW-h, aproximadamente equivalente a 8,244 km/galón, logró ocupar el primer puesto contra 22 competidores restantes. El vehículo es de tracción trasera con motor Brushless.



Figura 2.16. Equipo Eco Illini, ganadores de la competencia 2020 en Sonoma, California.
Fuente: Extraído de <http://mechanical.illinois.edu/news/eco-illini-team-takes-first-sets-school-record>

- Prototipo eléctrico de Milhagem UFMG (Universidade Feredal de Minas Gerais)

El equipo brasileño Milhagem UFMG logró el segundo puesto en la competencia del año 2019. Con 227 km/kW-h, es la mejor marca para un vehículo sudamericano. El prototipo cuenta con tracción trasera al equipar un motor DC Brushless acoplado a un sistema de transmisión.



Figura 2.17. Equipo Milhagem UFMG, subcampeones de la competencia de 2020 en Sonoma, California.
Fuente: Extraído de <https://milhagemufmg.com/nossos-prototipos/>

- Prototipo eléctrico de la universidad de Qatar (2014)

El equipo de la universidad de Qatar diseñó y fabricó un prototipo eléctrico para la competencia SEM-Asia 2014 desarrollado en Filipinas. El Prototipo cuenta con un motor DC Brushless de 48V,

15A y 750 W; este motor está acoplado a la llanta trasera a través de una transmisión por cadena, lleva un *sprocket* pequeño en el eje del motor y uno más grande para la llanta trasera, lo cual funciona como un reductor de velocidad. Además, cuenta con batería de polímero de litio de 48V, esta batería tiene una corriente de descarga constante de 5 A-h y está protegida por el sistema de gestión de batería (BMS). Adicionalmente, el prototipo cuenta con un panel solar que carga la batería cuando el auto está en competencia, este panel entrega 36V a una irradiancia solar de 1 kW/m^2 combinando 2 células solares policristalinas en serie de 18V a 10W. La energía del panel pasa por un circuito de potencia que tiene un elevador de voltaje (*boost converter*) para elevar el voltaje de 36V a los 55V que necesita la batería para ser cargada.

Por otro lado, el chasis está hecho de perfiles de aluminio de 20x20 mm y reforzado en el interior con 20x40 mm, ambos de 1mm de espesor, lo reduce bastante el peso del auto.

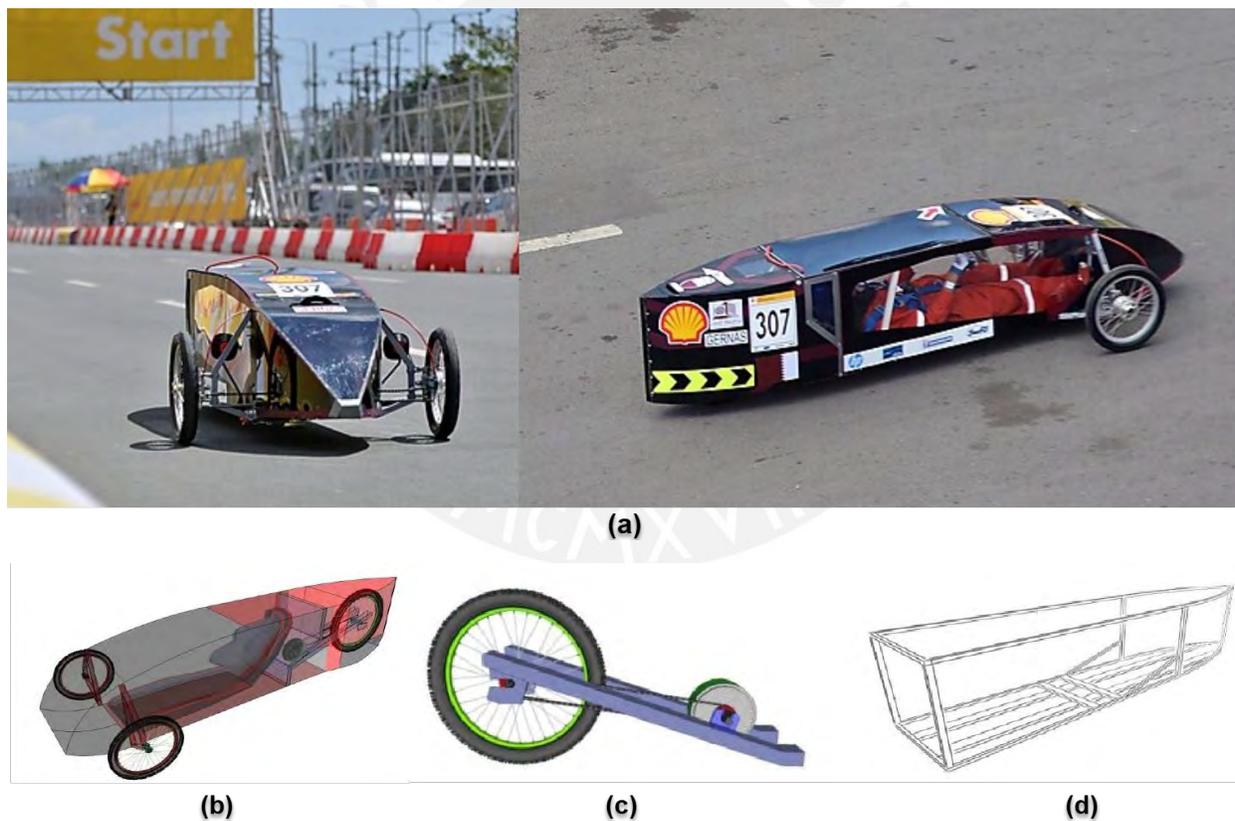


Figura 2.18. (a) Prototipo eléctrico de la universidad de Qatar año 2014, (b) Diseño en CAD del prototipo presentado en la misma competencia, (c) Diseño de la parte posterior entre la llanta motriz, el motor y el chasis posterior, (d) Chasis de la parte delantera con perfiles de aluminio más pequeños.
Fuente: Extraído de (Howlader, Chowdhury, Faiteer, Touati, & Benammar, 2014)

- Concepto Urbano eléctrico de la Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología (2017)

El vehículo eléctrico de la categoría concepto urbano fue desarrollado por Carlsen y Odin, dos estudiantes de maestría de dicha universidad, en conjunto con 23 voluntarios. El vehículo cuenta con 4 llantas: las dos primeras son directrices y el movimiento de ellas se logra a través de un volante, y el mecanismo piñón y cremallera; las dos llantas traseras son motrices y tienen un motor Brushless. Tienen suspensión Semi multi-link en la parte delantera y la suspensión trasera fue adaptada para alojar al motor, el cual se acopla a una transmisión por faja síncrona y poleas hechas de nylon, y tiene una potencia de 250W modelo RE65. Las baterías usadas son de iones de Litio de 48V con su gestor de baterías (BMS) correspondiente. Además, el sistema de control del auto incluye el control del motor a través de MOSFETS y señales PWM, el control de las luces, de los frenos, limpiaparabrisas y la pantalla indicadora de velocidad y estado de carga de las baterías.



(a)



(b)

(c)

Figura 2.19. (a) UrbanConcept de la Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología (2017) (b) Diseño de la polea para la faja síncrona que forma parte de la transmisión, (c) Diseño de suspensión trasera del vehículo, con el motor Brushless y la transmisión.

Fuente: Extraído de (Oma, 2017).

- Concepto Urbano eléctrico del Politécnico de Milán (2011)

En 2011, los alumnos del departamento de mecánica de la universidad Politécnica de Milán (Politecnico di Milano) desarrollaron el vehículo eléctrico de la categoría concepto urbano de nombre Daphne para la competencia del mismo año en Lausitzring, Alemania, logrando el 7mo puesto en dicha competencia con un consumo de 124.9 km/kW-h o su equivalencia en 1109 kl/l. Este vehículo tiene las ruedas delanteras directrices y las traseras motrices, las ruedas traseras tienen la peculiaridad de tener el sistema de suspensión y transmisión juntos. En este caso, el sistema de suspensión está integrado dentro de las llantas y cubierto con el aro de la rueda, la suspensión está diseñada con un soporte de aluminio en forma de C que tiene rodamientos en la parte superior e inferior, lo cual va unido al eje en forma de T permite el giro de las ruedas, la parte inferior de la pieza C es la que tiene al resorte y amortiguador. Por otro lado, el sistema de transmisión implica dos motores Brushless DC modelo RE50 de la marca Maxon, los cuales tienen 200W de potencia; estos motores están ensamblados dentro de la misma llanta del vehículo, transmitiendo la potencia por engranajes cilíndricos de dientes rectos, cada llanta posterior tiene su motor DC. Adicionalmente, el sistema eléctrico se complementa con un kit de baterías de iones de Litio de 5.8 A-h y 48V, y su gestor de baterías (BMS) correspondiente.



(a)

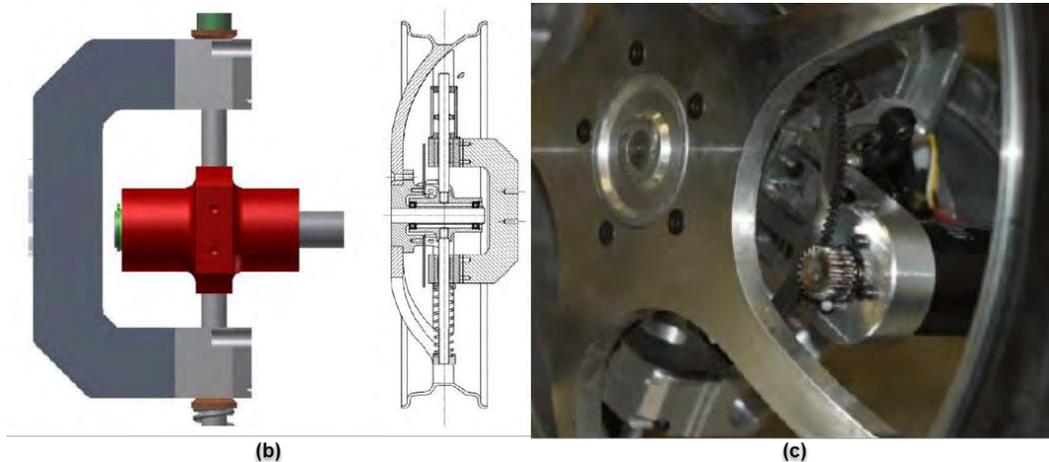


Figura 2.20. (a) Concepto Urbano del Politécnico de Milán llamado Daphne (2011), (b) Diseño del sistema de suspensión, (c) Diseño del sistema de transmisión con el motor DC Brushless.
Fuente: Extraído de (Carmeli, Castelli-Dezza, Galmarini, Mastinu, & Mauri, 2014).

- Prototipo de SEMA PUCP (Pontificia Universidad Católica del Perú, 2018)

El grupo SEMA (Shell Eco Marathon Américas) de la Pontificia Universidad Católica del Perú participó en la competencia durante 2 años seguidos, 2017 y 2018, ambas en la categoría prototipo de motor a combustión interna. Durante el 2018 se modificó la dirección, transmisión y carrocería del modelo anterior, manteniendo el chasis y el mismo motor. La dirección pasó a incorporar un mecanismo interno de 4 barras que se accionan por palancas y hacen que las llantas giren; la transmisión es tipo CVT (Transmisión continuamente variable) con dos poleas de aluminio y faja trapezoidal para accionarla. Además, la carrocería se hizo de planchas de MDF, de modo que sea de fácil fabricación y ensamblaje, y el motor sigue siendo el mismo, Honda GX100.

El sistema eléctrico del vehículo logró desactivar el motor cuando el auto está en movimiento en tramos rectos y activarlo al momento de pisar el acelerador, además de incluir la inyección directa al motor Honda, ya que este no venía con esa tecnología, lo cual aumentó la eficiencia del auto llegando aproximadamente a 500 km por litro de combustible.



(a)



(b)



(c)

(d)

Figura 2.21. (a) Parte posterior del vehículo prototipo, (b) Segundo vehículo prototipo de la Pontificia Universidad Católica del Perú (2018), (c) Transmisión CVT, (d) Motor Honda GX100.

Fuente: Elaboración propia.

2.3.3. Sistemas de transmisión de potencia

Para lograr el movimiento del vehículo, se puede acoplar un sistema mecánico de transmisión de potencia entre la salida del motor eléctrico y la llanta. Según lo observado en el apéndice 2.2.2, la transmisión para este tipo de vehículos suele ser por forma y por fricción. De modo que se suelen considerar fajas trapezoidales, síncronas, cadenas y engranajes.

Tabla 2.1. Características de los diferentes sistemas de transmisión de potencia.

Descripción	Engranaje 	Cadena 	Faja Síncrona 	Faja Trapezoidal 
Principio físico	Contacto e interacción por forma			Fricción
Relación de transmisión	≤ 8 normal 20 max. (helicoidal)	≤ 6 normal 10 max.	≤ 8 normal 15 max.	≤ 8 normal 15 max. (helicoidal)
Eficiencia	98-99%	97-98%	98%	96-98%
Velocidad	≤ 200 m/s	≤ 17 m/s	≤ 35 m/s	≤ 26 m/s
# Ruedas accionadas	2	varias		
Dimensiones	reducidas	ruedas más grandes	mayores	
Absorción de choques y vibraciones	no	Regular	si	
Lubricación	si	si	no	
Nivel de ruido	relativamente alto	medio	bajo	

<p>Ventajas</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Son más compactas con distancias entre centros reducidas. • Mayor velocidad que las fajas y cadenas. • Pueden transmitir mejor altas potencias a velocidades elevadas. • Los engranajes metálicos no se deterioran con el tiempo, la temperatura, el aceite ni la grasa; además que no desarrollan cargas eléctricas estáticas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Puede operar sin lubricación, como las cadenas de bicicletas. • De fácil montaje, necesita una pequeña tensión previa, por lo que genera baja carga en ejes. • Transmisión de potencia sin deslizamiento. • Se puede realizar la inversión de giro. • Se puede cubrir grandes distancias entre centros. • Pueden utilizarse a altas temperaturas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mejor absorción de choques y amortiguamiento. • Puede funcionar a mayores velocidades que una cadena, pero menores que las de un engranaje. • Más económicas. • Se utilizan en distancias de centros relativamente grandes. • Des acoplamiento sencillo. • Variación sencilla de la relación de transmisión.
<p>Desventajas</p>	<ul style="list-style-type: none"> • La transmisión de potencia es rígida. • La distancia de centros es invariable. • Elevado costo de fabricación. • Sensibles a cargas de impacto. • Producen un alto nivel de ruido. • Requieren constante lubricación. • Susceptibles a la fatiga superficial debido a elevados esfuerzos cortantes. 	<ul style="list-style-type: none"> • La velocidad y fuerza no son uniformes debido al efecto polígono. • El desgaste de las juntas de los eslabones produce un alargamiento en el paso de la cadena. • Son solo aptas para ejes paralelos y preferiblemente horizontales. • Se requiere un paralelismo exacto de ejes, especialmente en cadenas anchas. • Para sistemas de transmisión de cadenas en vertical, se requiere guías de deslizamiento. • Puede ocurrir vibraciones en caso de fuertes impactos periódicos y altas velocidades. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dado que la transmisión es por fricción, no transmite alto torque, para la síncrona que es por forma, logra transmitir mayor torque que la trapezoidal pero no llega a igualar al de una cadena. • Requieren mayores dimensiones constructivas. • Mayor carga en el eje, debido a la pretensión que requieren estas fajas. • Con el tiempo, la carga, la temperatura y la humedad aumenta el alargamiento remanente de la faja, lo que puede producir que la faja resbale • Variación del coeficiente de rozamiento a causa del polvo, aceite, humedad y suciedad. • Solo pueden soportar un rango de temperatura limitada (entre 50 y 60°C), a partir de los 140°C se produce la destrucción • Parcialmente sensibles a los ácidos, bases, gasolinas, aceites y vapor de agua.

2.4. Dominio Eléctrico-Electrónico

2.4.1. Catálogo Comercial

- Motores eléctricos:

Los motores eléctricos son los encargados de transformar la energía eléctrica proveniente de una fuente externa, a energía mecánica en el eje del motor o rotor a través de campos magnéticos generados en las bobinas. Para el caso de un vehículo eléctrico, el motor eléctrico recibe energía de las baterías y el control se hace a partir de un circuito controlador. Para la selección de los motores eléctricos, se consideró los más comerciales en la industria, así como los más usados en vehículos eléctricos.

Tabla 2.2. Tabla de los diferentes tipos de motores presente en la industria.

Motores	Ventajas	Desventajas
 <p data-bbox="224 1066 630 1098">Motor DC Brushless (BLDC)</p>	<p data-bbox="678 1066 1057 1570">Pueden llegar a tener altas potencias con tamaños más compactos. No emplean escobillas para hacer la conmutación para la transferencia de energía, sino que lo hacen electronicamente, por lo que tienen un menor mantenimiento y una mayor durabilidad. Además de evitar las pérdidas de energía por calor en las escobillas, lo que los hace más eficientes.</p>	<p data-bbox="1089 1066 1474 1570">Es de un coste mayor al motor DC convencional debido a su complejidad. Además, tienen un control más complejo, dependiendo siempre de un controlador para mantener el motor funcionando, el mismo que funciona para variar la velocidad. Por lo general necesita un sistema de transmisión para conectarse a las ruedas motrices del vehículo.</p>
 <p data-bbox="224 1608 630 1640">Motor DC Brushless en el aro</p>	<p data-bbox="678 1608 1057 1854">Este tipo de motor DC Brushless instalado directo en la llanta no necesita transmisión, lo que evita la reducción de la eficiencia que produce el sistema de transmisión. Son más baratos</p>	<p data-bbox="1089 1608 1474 1854">Este tipo de configuración del motor Brushless viene con bajas potencias, está limitado por el tamaño de la llanta, por lo que los motores independientes suelen tener más potencia.</p>

	que los motores BLDC convencionales.	
<p>Motor DC</p> 	<p>Son mucho más baratos que los BLDC, además tienen un control más simple y barato, por lo que no se requiere control si no se requiere variación de velocidad.</p>	<p>El mantenimiento es mayor en este tipo de motores a causa de las escobillas, lo que también reduce su eficiencia. Además, las escobillas limitan su velocidad. Tiene una inercia mayor que los BLDC y genera mayor ruido eléctrico que estos.</p>
<p>Motor AC Asíncrono trifásico</p> 	<p>Poseen más potencia que los motores monofásicos, variando entre los 300 kW y velocidades entre 900 y 3600 rpm, dependiendo del número de polos</p>	<p>Tienen un arranque más complicado en comparación de los motores monofásicos asíncronos. Además son más caros que los motores monofásicos y requieren una red trifásica de excitación.</p>
<p>Motor AC Asíncrono monofásico</p> 	<p>Es de bajo costo comparado con un motor trifásico. Tiene un arranque más sencillo con condensadores a comparación de un motor trifásico y puede ser arrancado directamente desde la red. El control de su velocidad es sencillo, solo es necesario variar</p>	<p>Por lo general poseen una potencia máxima de 3 kW, muy por debajo de las que suele llegar un motor trifásico.</p>

Fuente: Extraído de (Chau, 2015) y (Ehsani, Gao, & Emadi, 2009)

- BMS (Battery Management System):

Ante la creciente demanda de vehículos eléctricos, se ha vuelto una necesidad el uso de un gestor electrónico de baterías, el cual es el encargado de gestionar el proceso de carga y descarga de la batería, lo cual termina por alargar la vida útil de esta y optimiza su rendimiento.

Para ello, el BMS se encarga de medir las siguientes variables:

Tabla 2.3. Variables medidas por el BMS (Battery Management System).

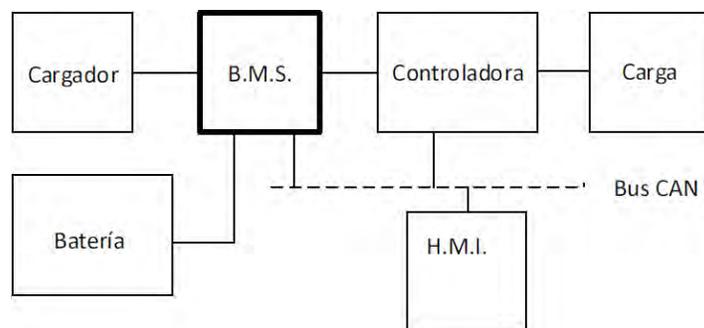
Variable	Característica
Voltaje	Voltaje total de la batería, además del voltaje individual de las celdas y el voltaje mínimo y máximo de cada una.
Temperatura	Temperatura promedio, temperatura de entrada del refrigerante, temperatura de salida de refrigerante o temperaturas de celdas individuales
Estado de carga (SOC)	El estado de carga (SoC) indica el nivel de carga actual de la batería en relación con su capacidad en valores porcentuales (100% = lleno y 0% = vacío).
Profundidad de descarga (DOD)	La profundidad de descarga (DoD) es el inverso del SoC (100% = vacío y 0% = lleno), el cual se usa con mayor frecuencia para referirse a la vida útil de la batería después de un uso repetido.
Estado de salud (SOH)	Valora el estado de la batería comparándola con condiciones ideales; es decir, da en % el valor de la vida de la batería que se desgasta con el uso.
Estado de energía (SOP)	Da la cantidad de energía disponible para un intervalo de tiempo definido teniendo en cuenta la energía actual, la temperatura otras condiciones.
Flujo de refrigerante	Revisa el nivel de refrigerante para baterías refrigeradas por líquido o aire.
Corriente	Corriente dentro y fuera de la batería

Fuente: Extraído de (Julián et al., 2015)

Cada BMS varía dependiendo del tipo de batería a utilizar, puesto que cada tipo diferente de batería está compuesto de materiales químicos diferentes, ello influye en la temperatura máxima que puede soportar la batería antes de correr riesgo de incinerarse o explotar (como puede ser el caso de las baterías de Litio). Por ello, no solo es necesario el control del estado de carga de la batería

o estado de salud, sino también la temperatura máxima admisible, todos estos valores en conjunto determinan el estado de vida de la batería.

Por otro lado, el BMS debe ubicarse entre el cargador, la batería y el sistema de control, ya que este debe verificar cuando una celda alcance máximo valor de voltaje para poder desconectarla, o cuando una celda necesite más voltaje para conectarla.



*Figura 2.22. Ubicación del BMS en el sistema de control.
Fuente: Extraído de (Vega & Fabelo, 2014)*



- Baterías:

Para los tipos de baterías que se pueden utilizar en el prototipo eléctrico de 3 ruedas, se consideraron la mayor parte de baterías disponibles en el mercado, así como las que son más usadas para vehículos eléctricos. Toda la información se encuentra resumida en la siguiente tabla:

Tabla 2.4. Diferentes tipos de baterías presentas en la industria.

Baterías	Datos	
<p style="text-align: center;">Ácido-Plomo</p> 	<p style="text-align: center;">Características</p>	<p>Está formada por un depósito de ácido sulfúrico, que lleva dentro un conjunto de electrodos de plomo paralelas entre sí. Las celdas se agrupan en elementos o vasos y cada celda entrada 2V, por lo que al acumular 6 elementos se tiene 12V (normalizado para vehículos ligeros) o 12 elementos para lograr 24V (para vehículos pesados).</p>
	<p style="text-align: center;">Ventajas</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Son de bajo coste y sencilla fabricación en serie
	<p style="text-align: center;">Desventajas</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Son baterías que no se pueden someter a sobrecargas o descargas intensas, además de ser demasiado contaminantes. • Estas baterías forman cristales, y será entonces cuando el proceso de carga y descarga dejen de actuar correctamente. • Tienen una densidad de energía baja (30 Wh/kg), por lo que son muy pesadas.
	<p style="text-align: center;">Aplicaciones</p>	<p>Es muy utilizado en autos, motos, barcos y sistemas fotovoltaicos.</p>
<p style="text-align: center;">Pilas alcalinas</p> 	<p style="text-align: center;">Características</p>	<p>Usan hidróxido de potasio como electrólito, así como una reacción química entre zinc y dióxido de magnesio para generar electricidad. Además, produce aproximadamente 1.5V por celda.</p>
	<p style="text-align: center;">Ventajas</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Destacan por tener una corriente de gran estabilidad • Tienen una densidad de energía intermedia, mayor que las pilas salinas.
	<p style="text-align: center;">Desventajas</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Son habitualmente desechables y altos contaminantes • Se pueden generar fugas de hidróxido de

		potasio, lo cual es altamente contaminante y puede irritar la piel
	Aplicaciones	En juguetes, linternas o mandos a distancia.
<p>Níquel-Hierro (Ni-Fe)</p> 	Características	Están formados por tubos finos enrollados en láminas de acero niquelado, el interior de los tubos usa hidróxido de níquel y como electrolito, una mezcla de potasa cáustica.
	Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Son de bajo costo y fácil fabricación • Admite sobrecargas, repetidas descargas totales e incluso cortocircuitos sin pérdida significativa de capacidad. • No es contaminante, el electrolito diluido se puede utilizar en fines agrícolas • Tienen una vida útil muy larga • Funcionan a un mayor rango de temperaturas, entre $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $46\text{ }^{\circ}\text{C}$ • Son fáciles de cargar y descargar sin efecto memoria.
	Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Poseen una eficiencia de 65%, muy baja respecto a las demás
	Aplicaciones	Es de uso industrial generalmente, también en instalaciones fotovoltaicas, eólicas y solares.
<p>Níquel-Cadmio (Ni-Cd)</p> 	Características	Se utiliza el ánodo del cadmio y el cátodo de hidróxido de níquel, con un hidróxido de potasio como electrolito. Generalmente cada celda proporciona un voltaje de 1.2V con capacidad de 0.5 a 1.0A (en pilas AA)
	Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Son perfectamente recargables • Admiten un rango de temperaturas muy amplio • No se deterioran mucho con la sobrecarga
	Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • El cadmio es caro y peligroso para el medio ambiente • Poseen baja eficiencia energética (50 Wh/kg) • Tienen un efecto memoria muy alto
	Aplicaciones	Se usan en electrodomésticos pequeños y proyectos de electrónica.
Níquel-Hidruro metálico (Ni-MH)	Características	Utilizan un ánodo de hidróxido de níquel y un cátodo de una aleación de hidruro metálico. Cada pila puede proporcionar un voltaje de 1.2V y una capacidad entre 0.8 y 2.9 A-h (en pilas tipo AA).

	<p>Ventajas</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Son recargables, puede soportar entre 500 y 2000 cargas. • Tienen una densidad de energía mayor (80 hasta 100 Wh/kg), entre 2 y 3 veces más que una pila NiCd del mismo tamaño. • Se ven menos afectadas por el efecto memoria.
	<p>Desventajas</p>	<ul style="list-style-type: none"> • No trabajan bien en frío extremo, lo cual reduce drásticamente la potencia eficaz que puede entregar la batería. • Al sobrecalentarse puede llegar a explotar debido a que está hecho de materiales inflamables. • Su fabricación es costosa. • Su salida de corriente es bastante inestable, lo que motiva a usar convertidores para estabilizar la tensión.
	<p>Aplicaciones</p>	<p>En aparatos electrónicos de gran consumo de energía que requieran de un cargador. Además, fueron las primeras baterías en utilizarse en autos eléctricos.</p>
	<p>Iones de Litio (Li-ion)</p> 	<p>Características</p>
<p>Ventajas</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tienen un mínimo efecto memoria; es decir, permiten múltiples cargas y descargas sin verse afectado el rendimiento de la batería. • Tienen una alta densidad energética (115 Wh/kg) 	
<p>Desventajas</p>	<ul style="list-style-type: none"> • No admite bien los cambios de temperatura. • No admite descargas completas y sufren mucho cuando estas suceden 	
<p>Aplicaciones</p>	<p>Se utiliza en teléfonos celulares, tabletas, vehículos eléctricos.</p>	
<p>Polímero de Litio (LiPo)</p>	<p>Características</p>	<p>Muy similares a las baterías de iones de litio, pero tienen mayor densidad de energía, así como admiten una tasa de descarga muy superior. Generalmente tienen un tamaño más reducido respecto a las demás baterías con las mismas características.</p>

	Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Tamaño reducido debido a la mayor densidad de carga. • Buena tasa de descarga, muy superior a las de iones de litio.
	Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Quedan prácticamente inútiles si se descargan por debajo de 3V, que es el mínimo ya que, si no se respeta, se daña la pila irreparablemente.
	Aplicaciones	Drones, AUV's, ROV's, UAV's y otros dispositivos que necesiten alta potencia y duración en dispositivos pequeños.

Fuente: Extraído de (Padrón Javbib, 2013)

- Encoder rotativo:

Son transductores que sirven para registrar la posición angular del eje del motor, medir la velocidad o el sentido de rotación. Existen dos tipos principales de encoders, los incrementales y los absolutos.

Los encoders incrementales o de cuadratura se caracterizan por que proveen un número específico de pulsos equivalentes espaciados por revolución. Estos proporcionan dos ondas cuadradas desfasadas entre sí 90° eléctricos, estas ondas tienen el nombre de Canal A y Canal B. Con la lectura del Canal A se puede obtener la velocidad de rotación, con la lectura del Canal B se puede obtener la dirección de giro, esto depende de que señal se recibe primero, A o B se puede saber si el eje del motor está girando en sentido horario o antihorario.

Por otro lado, los encoders absolutos generan mensajes digitales, los cuales representan la posición actual, su velocidad o sentido de movimiento; normalmente estos encoders suelen tener un bus de varias líneas que indican en binario la posición. El inconveniente de estos encoders es la cantidad de líneas que es necesaria leer y conectar, debido a la complejidad del disco óptico.

Generalmente, debido a la complejidad del encoder absoluto, estos suelen ser más caros que los incrementales, por lo que su uso se enfoca más en aplicaciones donde conocer la posición del eje con respecto al tiempo es muy importante, como lo pueden ser en robótica, donde la posición de los brazos de los robots es muy importante para no dañar al mismo en un mal movimiento.

Por otro lado, los encoders incrementales suelen ser más baratos debido a la poca complejidad de sus componentes, acompañado de su sencillez de operación. Estos encoders sirven muy bien para

poder hallar la velocidad y sentido de giro del motor, mas no para aplicaciones en las que es importante conocer la posición del eje del motor antes del arranque, debido a que el encoder incremental debe ser recalibrado antes de comenzar; no obstante, el absoluto siempre conoce su posición inicial definida dentro de su propio marco de referencia absoluto.

Hay encoders ópticos los cuales funcionan con un emisor de luz, un disco con un patrón de agujeros y un receptor de luz. El giro del disco permite que algunos haces de luz pasen por los agujeros y otros no, esto llega al fotorreceptor, el cual genera una señal que puede ser leída como velocidad, posición o sentido de giro.

También hay encoders magnéticos, los cuales funcionan usando el principio de efecto Hall, el cual genera un voltaje de salida en la presencia de un campo magnético variable.

Debido a la aplicación y el enfoque que tendrá el encoder, el cual será medir la velocidad y el sentido de giro del motor eléctrico del vehículo, se optará por usar un encoder incremental óptico o magnético.



Figura 2.23. Encoder rotativo incremental magnético.

Fuente: Extraído de <https://www.directindustry.es/prod/timken-europe/product-7626-1821154.html> y (Rodríguez-ponce, 2019)

- Botón de Emergencia:

Actuador utilizado para apagar el sistema en caso de alguna eventualidad que pueda dañar el equipo. El vehículo requiere que se tengan 2 botones, uno adentro del auto y otro en la carrocería, afuera del auto, que sea visible para gente independiente del conductor. Este botón de emergencia corta la energía entre la batería y el controlador y apaga de manera general todo el vehículo.



Figura 2.24. Botón de emergencia.

Fuente: Extraído de <https://www.euchner.de/es-es/productos/dispositivos-de-parada-de-emergencia/dispositivo-de-parada-de-emergencia-es/>

2.5. Dominio de Control

2.5.1. Catálogo Comercial

- Microcontroladores:

Para los microcontroladores, se consideró los que son de fácil programación, lenguaje de programación conocido y de fácil acceso en el mercado peruano.

Tabla 2.5. Diferentes tipos de microcontroladores presentes en la industria.

Microcontrolador	Ventajas	Desventajas	Datos técnicos
<p data-bbox="321 373 440 405">Arduino</p> 	<p data-bbox="591 338 829 877">Son de bajo coste De fácil programación con código abierto. Es de hardware libre, por lo que es sencillo obtener su esquemático y diseño Gran variedad de placas, de ser necesario más pines, se puede optar por usar el Arduino Mega.</p>	<p data-bbox="862 338 1045 695">Dado que el lenguaje de programación no está hecho en assembler, toma un poco más de tiempo la ejecución de las librerías.</p>	<ul data-bbox="1068 338 1446 730" style="list-style-type: none"> • Microcontrolador: ATmega 2560 • Voltaje de entrada: 7-12V • Voltaje de operación: 5V • Pines GPIO: 14 (6 PWM) • Pines analógicos 6 • 32k de memoria Flash • SRAM 2KB • EEPROM 1KB • Reloj de 16Mhz de velocidad
<p data-bbox="250 919 505 951">Raspberry Pi 3 B+</p> 	<p data-bbox="591 888 829 1434">Es un ordenador de bajo coste de placa reducida. Es de hardware libre con software de código abierto. Consumo muy poca energía (1.2 W en reposo y 1.8 W a pleno rendimiento). Se usa ampliamente para programas que requieran visión por computadora.</p>	<p data-bbox="862 888 1045 1503">Para comenzar a programar es necesario que la raspberry pi se conecte a internet. No presenta pines analógicos Tiene un costo más elevado que los demás microcontroladores presentados.</p>	<ul data-bbox="1068 888 1458 1465" style="list-style-type: none"> • CPU + GPU: BroadcomBCM2837B0 • ARM Cortex-A53 (ARMv8) 64-bit SoC @ 1.4GHz • Wi-Fi + Bluetooth: 2.4GHz y 5GHz IEEE 802.11.b/g/n/ac, Bluetooth 4.2, BLE • RAM: 1GB LPDDR2 SDRAM • Ethernet: Gigabit Ethernet sobre • USB 2.0 (300 Mbps) • GPIO de 40 pines • 1 puerto HDMI • 4 puertos USB 2.0
<p data-bbox="250 1545 505 1577">Tiva C Launchpad</p> 	<p data-bbox="591 1514 829 1871">Es un ordenador de bajo coste de placa reducida. Consumo muy poca energía (0.5W en reposo). Presenta mayor cantidad de pines GPIO en contraste con Arduino Uno</p>	<p data-bbox="862 1514 1045 1902">La pequeña cantidad de pines I/O a diferencia de los demás microcontroladores. Debe programarse en Code Composer de Texas</p>	<ul data-bbox="1068 1514 1442 1871" style="list-style-type: none"> • CPU ARM Cortex-M4 de 120 Mhz y 32 bits con punto flotante • Flash de 1 MB • SRAM de 256 KB • EEPROM de 6 KB • Interfaz de depuración en circuito y en placa (ICDI) • Frecuencia de reloj de 80MHz

		<p>Instruments, lo cual resulta ligeramente más complejo con el Arduino. Tiene un costo ligeramente más elevado que el Arduino</p>	
<p>Teensy 3.2</p> 	<p>Es un microcontrolador de gran potencia y pequeño tamaño. Se puede programar directamente desde el IDE de Arduino en su lenguaje de programación o en C. Además, es compatible con la mayoría de librerías de Arduino. Su forma está pensada para que pueda ser montada fácilmente en protoboards.</p>	<p>El precio es más elevado en comparación a los microcontroladores mencionados anteriormente (aproximadamente 300 soles).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Procesador: 32 bit ARM Cortex-M4 72 MHz CPU (MK20DX256VLH7) • Memoria: 256K, 64K RAM, 2K EEPROM • 14 pines analógicos de alta resolución (13 bits usables y 16 bit en hardware) • 34 pines digitales I/O (10 son compartidos con los analógicos) DMA de 16 canales • 12 salidas PWM • 7 temporizadores (Timers) DMA dedicado para USB • 3 puertos UARTs (serie) Protocolos soportados: SPI, I2C, I2S, modulador IR • I2S (para interfaz de audio de alta calidad) • Soporta RTC añadiendo un cristal de 32.768 KHz y batería externa • 4 canales DMA para uso general (separados del USB) • Dimensiones: 35x18 mm

<p style="text-align: center;">ESP32</p> 	<p>Microcontrolador de bajo costo y consumo de energía</p>	<p>Presenta poca cantidad de pines GPIO a comparación de los demás.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Procesador: CPU: Xtensa dual-core (or single-core) 32-bit LX6 microprocesador,operando a 160 o 240 MHz y realizado hasta 600 DMIPS • Ultra low power (ULP) co-processor • Memoria: 520 KiB SRAM • Wi-Fi: 802.11 b/g/n/e/i • Bluetooth: v4.2 BR/EDR and BLE
---	--	---	--

Fuente: Extraído de (Raspberry Pi Foundation, 2016), (Arduino Store, n.d.), (Espressif Systems, 2019), (PJRC, n.d.), (Texas Instruments, 2014)



- Drivers para motores Brushless:

Para el control de motores BLDC existen diferentes circuitos impresos comerciales compatibles con los diversos tipos de microcontroladores comerciales.

Tabla 2. 6. Drivers comerciales para el control de motores Brushless.

Controladores	Descripción	Características
<p>Driver para control de motor Brushless con IFX007T</p> 	<p>Este circuito integrado puede funcionar con Arduino. En todo el circuito hay tres integrados IFX007T, el cual presenta un Mosfet canal n y uno canal p. El puente H creado por los IFX007T es fácil de controlar mediante la aplicación de señales PWM al pin IN, con esta señal se varia la velocidad de los motores.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Control del motor BLDC de hasta 250 W. ▪ De 8 a 24 V de valor nominal (valor máximo 6 a 40 V). ▪ Corriente promedio del motor de 30 A restringida a la disipación de potencia limitada por el IFX007T. ▪ Capaz de soportar una onda PWM de 25 kHz. ▪ Circuito del controlador con entradas de nivel lógico.
<p>Driver para control de motor Brushless TB6605FTG</p> 	<p>Este circuito integrado es un controlador de motor BLDC que tiene un sistema integrado compatible con Arduino. Admite una entrada DC de 9V a 24 V y puede emitir una corriente continua para impulsar el motor. Con el potenciómetro integrado se puede ajustar la velocidad de los motores. Con la interfaz integrada I2C se puede trabajar con otros módulos, por ejemplo, se puede utilizar una pantalla LCD RGR para mostrar la velocidad del motor.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Amplio rango de voltaje de entrada: 9V a 24V ▪ Tensión de alimentación: 3.3V / 5V. <ul style="list-style-type: none"> ▪ Interfaz I2C ▪ Control de velocidad ajustable por potenciómetro incorporado <ul style="list-style-type: none"> ▪ Múltiples modos disponibles: Onda cuadrada / onda sinusoidal, freno / normal, CW / CWW.

Extraído de: (Infineon, 2019) y (SeedStudio, 2018).

2.6. Objetivos y Alcance

A continuación, en base al estado del arte estudiado y a la lista de exigencias presentada, se presentará el objetivo general del presente trabajo de investigación, así como los objetivos específicos que se deben lograr para llegar al objetivo general.

2.6.1. Objetivo General

- Elaborar una propuesta de solución para el Chasis, Dirección y sistema de propulsión eléctrico para un vehículo de la categoría prototipo con miras a que el grupo Newro pueda participar en la competencia Shell Eco Marathon.

2.6.2. Objetivos Específicos

- Identificar las necesidades de la problemática del presente trabajo de investigación
- Seguir la metodología de diseño según la norma VDI 2221.
- Estudiar la tecnología actual para poder desarrollar el diseño conceptual, lo cual comprende de lo siguiente: Elaboración de la lista de exigencias, estructura de funciones, matriz morfológica y 3 conceptos de solución.
- Elaborar el diseño preliminar, para ello es necesario cálculos generales de dimensionamiento, arquitectura de hardware y modelado en software CAD.

2.6.3. Alcance

- El presente documento de investigación tendrá el alcance de mostrar el diseño preliminar del chasis, dirección y suspensión del vehículo; así como mostrar la arquitectura de hardware principal de la cual se partirá en futuros documentos para desarrollar el controlador electrónico del vehículo.
- El presente documento debe servir como guía para estudiantes universitarios con interés en desarrollar vehículos eléctricos enfocados en la competencia de Shell o similares.

CAPÍTULO 3

DISEÑO CONCEPTUAL

En el presente capítulo, se comenzará mostrando la lista de requerimientos del presente trabajo para lograr una abstracción de las principales entradas y salidas del sistema (Blackbox), gracias a este diagrama, se mostrará la estructura de funciones parciales y totales, las cuales permitirán plantear tres propuestas de solución al final del capítulo.

3.1. Lista de Exigencias

La lista de exigencias se realizará en base a las reglas de la competencia Shell Eco Marathon edición 2020 (Shell Eco-marathon, 2020), las cuales se resumirán en el cuadro mostrado en el Anexo 1. Esta lista de exigencias habrá requerimientos obligatorios, los cuales provienen directamente de las reglas para poder competir, y requerimientos deseables, los cuales ayudarán a mejorar el desempeño del vehículo si es que se cumplen, pero de no cumplirse, tampoco afectará la funcionalidad.

3.2. Función Total o Abstracción (Blackbox)

Para encontrar la solución a la problemática del diseño del sistema motriz eléctrico y de control del vehículo prototipo, primero se debe visualizar este sistema como un bloque con mecanismos desconocidos dentro del cual solo se conoce las entradas y las salidas, a continuación, se presentarán las entradas y salidas de la caja negra o Blackbox.

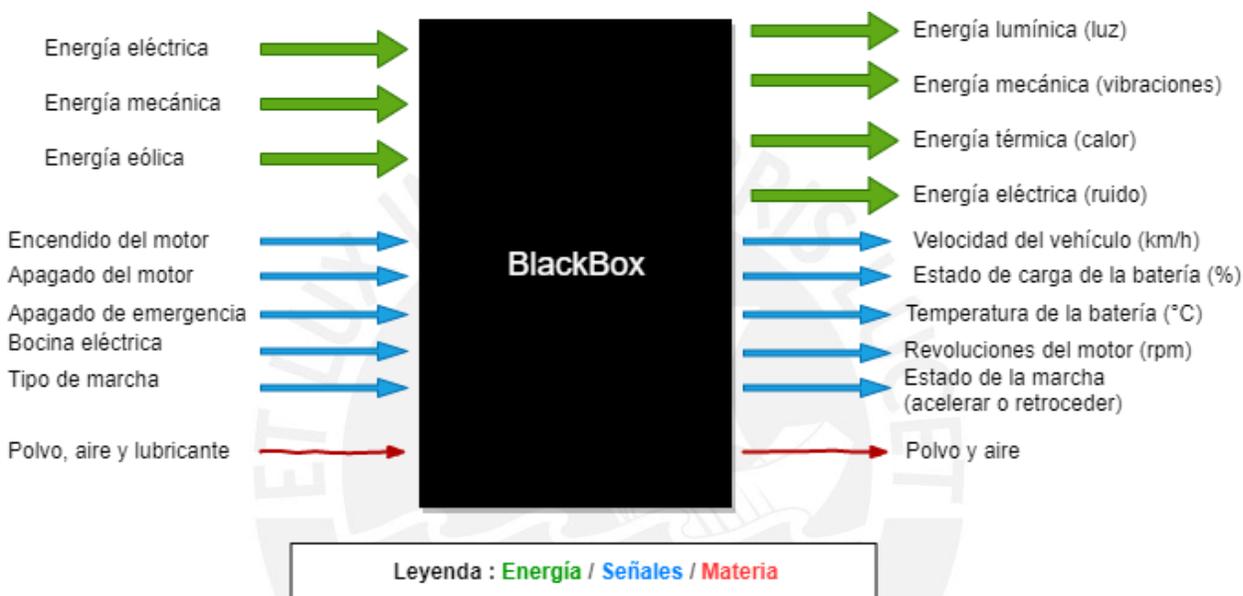


Figura 3.1. Blackbox del sistema completo.
Fuente: Elaboración propia.

3.2.1. Entradas

- **Energía:** Para la energizar el sistema motriz del vehículo se utilizará energía eléctrica proveniente de una batería, además se utilizará energía mecánica proveniente del piloto para accionar los actuadores, variar los parámetros dinámicos del vehículo, direccionar al vehículo y para frenarlo. Finalmente, se utilizará energía eólica para ventilar los componentes de potencia, así como la batería, entre otros.
- **Señales:** La primera señal de entrada será la de encendido del motor, en general, encendido del vehículo; además, el apagado del motor para desenergizar el

sistema eléctrico por completo; por otro lado, se necesita una señal de apagado de emergencia en caso se pierda control del vehículo o el piloto no pueda apagar el motor. Finalmente, la bocina eléctrica es otra señal de entrada para advertir a conductores en caso de adelantos y el tipo de marcha indica en qué sentido se desea mover el vehículo, adelante o en reversa.

- **Materia:** Como materia de entrada se tiene el polvo, el cual es parte del ambiente, el aire para refrigerar los componentes del vehículo, el lubricante para la transmisión y líquido de frenos para el sistema de frenos hidráulicos.

3.2.2. Salidas

- **Energía:** Para la salida se tendrá energía lumínica proveniente de leds indicadores de estado. Por otro lado, las demás salidas son consideradas pérdidas de energía, como las vibraciones mecánicas, el calor o el ruido eléctrico.
- **Señales:** Como señales de salidas más importantes están la velocidad del vehículo en km/h, el estado de carga de la batería en %, la temperatura de la batería en °C, las revoluciones del motor en rpm y el estado de marcha; es decir, adelante o reversa; todas estas señales de salida deben estar mostradas en una interfaz que pueda ver el piloto.
- **Materia:** Como materia de salida se consideraron el aire proveniente de la ventilación de las baterías; el polvo, el cual es inevitable debido a las condiciones naturales del ambiente y el lubricante en caso sea necesario cambiarlo.

3.3. Funciones Parciales o Procesos Técnicos

Para una mejor elaboración de la solución a la problemática se debe fragmentar la función total de la máquina en distintas funciones parciales las cuales ayuden a resolver la problemática y de esta forma facilitar la visualización de la solución.

Secuencia de operaciones:

- Encendido del auto: Se debe presionar un botón que emita una señal al controlador y este pueda emitir una señal al BMS para saber el estado de carga de la batería, el BMS devuelve la información al controlador, si el estado de carga está dentro del rango permitido, este conectará la batería con el circuito de potencia. Luego, el controlador enviará la señal correspondiente para activar al circuito de potencia dependiendo de la señal que mande el acelerador y con ello se energizará el motor y ya se podrá transmitir la potencia mecánica a la rueda.
- Apagado del auto: Se debe presionar un botón que emita una señal al controlador, este debe mandar la señal al circuito de potencia que permita cortar la energía eléctrica al motor y luego cortar la energía eléctrica a todo el sistema, que permita apagar el controlador de manera tranquila.
- Cambio de marcha: Se debe presionar un botón que emita una señal al controlador que indique en qué dirección desea uno moverse, adelante o en reversa. Luego el controlador emite una señal al circuito de potencia que energiza el motor o invierte la señal para energizar al motor en sentido contrario y retroceder el auto. Este retroceso está restringido a pocas revoluciones, ya que el auto no puede acelerar demasiado si se está retrocediendo.
- Apagado de emergencia: Este apagado consiste en 2 interruptores que está conectados entre la batería y el controlador, en el momento que se presionan los apagados de emergencia, se abre el conector y automáticamente se des energiza todo el sistema.
- Encendido de actuadores: Los sensores serán capaces de enviar información como temperatura de los principales componentes al controlador, de modo que este pueda activar a los actuadores pertinentes energizándolos a través de la batería. De este modo, cuando el controlador tenga información de que los principales

componentes del sistema motriz no se encuentran trabajando fuera de sus condiciones naturales, apagará los actuadores.

3.4. Estructura de Funciones por Dominio

Con los dominios identificados antes, se procederá a identificar que funciones parciales ejecutará cada uno.

3.4.1. Dominio Mecánico

Este dominio se encargará de las siguientes funciones parciales:

- **Soportar y aislar la batería:** La batería debe estar fijada al chasis de manera que quede lo más rígida, además que esté cubierta de metal para aislarla del piloto.
- **Soportar el motor:** El motor debe estar fijado rígido al chasis en la parte posterior, con elementos que mitiguen las vibraciones a este.
- **Soportar componentes electrónicos:** Los componentes electrónicos deben colocarse en la parte posterior del chasis y fijados rígidamente.
- **Reducir potencia de salida del motor:** La potencia mecánica de salida del motor es reducida por un reductor que luego conecta al sistema de transmisión de potencia mecánica a la rueda
- **Transmitir potencia mecánica a la rueda:** La potencia mecánica proveniente del reductor debe transmitirse a la rueda tratando de reducir lo menor posible las pérdidas.
- **Girar del eje de dirección:** El piloto debe ser capaz de girar el eje de dirección a través de un mecanismo apropiado.
- **Girar las llantas:** El eje de dirección debe permitir al usuario girar las ruedas del vehículo tanto a la derecha como a la izquierda mediante un mecanismo apropiado.
- **Soportar todo el vehículo:** El Chasis debe ser capaz de soportar al piloto y a los subsistemas adicionales que conforman el vehículo.

- **Proteger al piloto:** El Chasis debe cumplir el reglamento de la competencia para que, en caso de un accidente, el piloto no resulte con daños graves.
- **Detener el vehículo:** El sistema de frenos debe permitirle al piloto detener el vehículo en su totalidad ofreciendo seguridad.

3.4.2. Dominio Eléctrico-Electrónico

Este dominio lo comprenden los sensores, actuadores, batería y el interfaz. Cada uno se encargará de las siguientes funciones parciales:

- Sensores:
 - **Medir revoluciones del motor:** Es necesario el dato sobre las revoluciones del motor para poder mostrarlo en la interfaz gráfica, además de conocer la velocidad.
 - **Medir voltaje del motor:** Censar el voltaje presente en las bobinas del estator para poder restimar la potencia y realizar el sistema de control negativo a la velocidad.
 - **Medir el estado actual de carga de la batería (SoC):** Porcentaje actual de carga que le queda a la batería.
 - **Medir el estado de salud de la batería (SoH):** Porcentaje actual de la vida útil de la batería restante respecto a cuando estaba nueva.
 - **Medir voltaje y corriente de las celdas de la batería**
 - **Medir temperatura de la batería, motor y controlador**
 - **Medir cambio de marcha:** Censar si se desea avanzar o retroceder.
 - **Medir cambio de velocidad:** Censar el acelerador para entregar esa información al controlador.

- Actuadores:
 - **Refrigeración de la batería, controlador y motor:** A través de ventiladores o disipadores de calor, para evitar sobrecalentamiento o incineraciones.
 - **Accionar indicadores led:** Para indicar el estado actual del vehículo, como el tipo de marcha que se está dando (avanzar o retroceder), así como indicar si está encendido o apagado.
 - **Motor eléctrico:** Es el principal actuador, puede variar su velocidad o el sentido de giro dependiendo del controlador.
 - **Accionar bocina eléctrica:** Sirve para advertir en caso se quiera sobrepasar a otro conductor durante la competencia.

- Batería:
 - **Almacenar energía:** La batería almacena la energía que se le entrega cuando se la carga con una fuente de 220V a 60Hz (red peruana). (Fuente que necesita mi batería para cargarse)
 - **Acondicionar energía:** Transformar la energía de la batería mediante circuitos de potencia para alimentar a los sensores, actuadores, controlador y la interfaz.

- Interfaz:
 - **Apagado de emergencia:** Para evitar accidentes en caso falle algún sistema dentro del vehículo.
 - **Fin del sistema:** Para apagar de manera segura el sistema.
 - **Inicio del sistema:** Para encender el sistema mediante un botón en la interfaz.
 - **Visualizar parámetros dinámicos del vehículo:** Pantalla que permitirá visualizar parámetros dinámicos como la velocidad en km/h, las revoluciones del motor en rpm, el porcentaje de carga de la batería en % y el tipo de marcha (adelante o atrás).

3.4.3. Dominio de Control

Este dominio lo comprende el controlador (el BMS, gestor de la batería, está incluido dentro del controlador), del cual se obtuvo las siguientes funciones parciales:

- **Calcular el tipo de marcha del auto:** Interpretar la señal del botón para entregar a la interfaz qué marcha se tiene en el momento.
- **Calcular las revoluciones del motor:** Interpretar la señal analógica del sensor para entregar a la interfaz las revoluciones en el instante.
- **Control del estado de carga de las baterías:** Interpretar la señal analógica del sensor para evitar consumir hasta el mínimo porcentaje permitido por las baterías y así, evitar dañarlo completamente.
- **Calcular la temperatura en la batería:** Interpretar la señal analógica del sensor para evitar que la batería se caliente mucho hasta que pueda llegar a incinerarse.
- **Calcular la velocidad:** Interpretar la señal del sensor de revoluciones para calcular la velocidad actual.
- **Controlar la velocidad:** Realizar un lazo de realimentación para tener un control preciso de la velocidad dada.
- **Controlar la temperatura en los componentes:** Interpretar la señal de los sensores para que los componentes como el controlador y el motor no se calienten demasiado.
- **Control de estado actual del vehículo:** Monitoreo total sobre los parámetros puestos por el piloto para mostrarlos en la interfaz.

3.4.4. Estructura de funciones integrada

Finalmente, juntando todos los dominios se puede obtener la estructura de funciones integrada, el cual muestra el funcionamiento total del sistema, mostrado en el Anexo2.

3.5. Conceptos de Solución Integrados

3.5.1. Concepto de Solución 1

Se emplea un sistema de baterías de Ion-Litio con su respectivo circuito de potencia que permita alimentar a todos los sensores y actuadores, además de incluir su BMS (Battery Management System) para gestionar parámetros de la batería, como su carga. También se utilizará un encoder incremental óptico para registrar la velocidad del motor en rpm, un sensor de voltaje DC para medir la tensión en las bobinas del motor, un sensor de temperatura, un acelerador de bicicleta eléctrica tipo manubrio y un pulsador doble para el cambio de marcha. Luego, se empleará un motor Brushless DC para todo el movimiento, también un diodo led como indicador en caso de problemas, la refrigeración se hará por aire a través de ventiladores y se utilizará una bocina eléctrica. Además, se utilizará un botón de apagado de emergencia, un switch on/off para encender y apagar el vehículo y una pantalla LCD de 16x2 para la visualización de los parámetros dinámicos del vehículo. El controlador general será un microcontrolador, que puede ser Arduino.

Por otro lado, el chasis propuesto es metálico monocasco, el sistema de dirección es por varillas tipo kart, las cuales están unidas por rótulas a otro varillaje que sirve para direccionar el vehículo, todo este mecanismo se parece al sistema de dirección usado por las bicicletas de tres ruedas (*trikes*).

Adicionalmente, el motor estará unido directamente al chasis por uniones atornilladas, la batería estará dentro de una caja de aluminio también unido al chasis por soldadura y se utilizará un reductor por engranajes cilíndricos de una sola relación de velocidad para aumentar el par del motor. Además, los componentes electrónicos estarán en una carcasa transparente unida al chasis y la transmisión de potencia del motor a la rueda se hará a través de faja síncrona y polea.

Esta solución tiene la ventaja de que el motor podrá reemplazarse por uno de mayor potencia en caso se requiera llegar a mayor velocidad; además, permite seleccionar motores de mayor potencia debido a la libertad de espacio. Por otro lado, la faja síncrona tiene transmisión por forma, por lo que no se verá muy afectada por el polvo o suciedades del ambiente. El reductor por engranajes cilíndricos de una sola marcha resultan ser de fácil diseño y una fabricación no tan compleja. Por otro lado, el acelerador de bicicleta se puede acoplar fácilmente al sistema de dirección actual, por lo que no es necesario diseñar un soporte para pedales, y el encoder incremental óptico resulta ser de los más baratos y sencillos de operar.

En conclusión, esta solución puede ser la más económica de implementar y la de más fácil mantenimiento, debido a que la mayoría de sus piezas se pueden encontrar a nivel nacional (Perú).

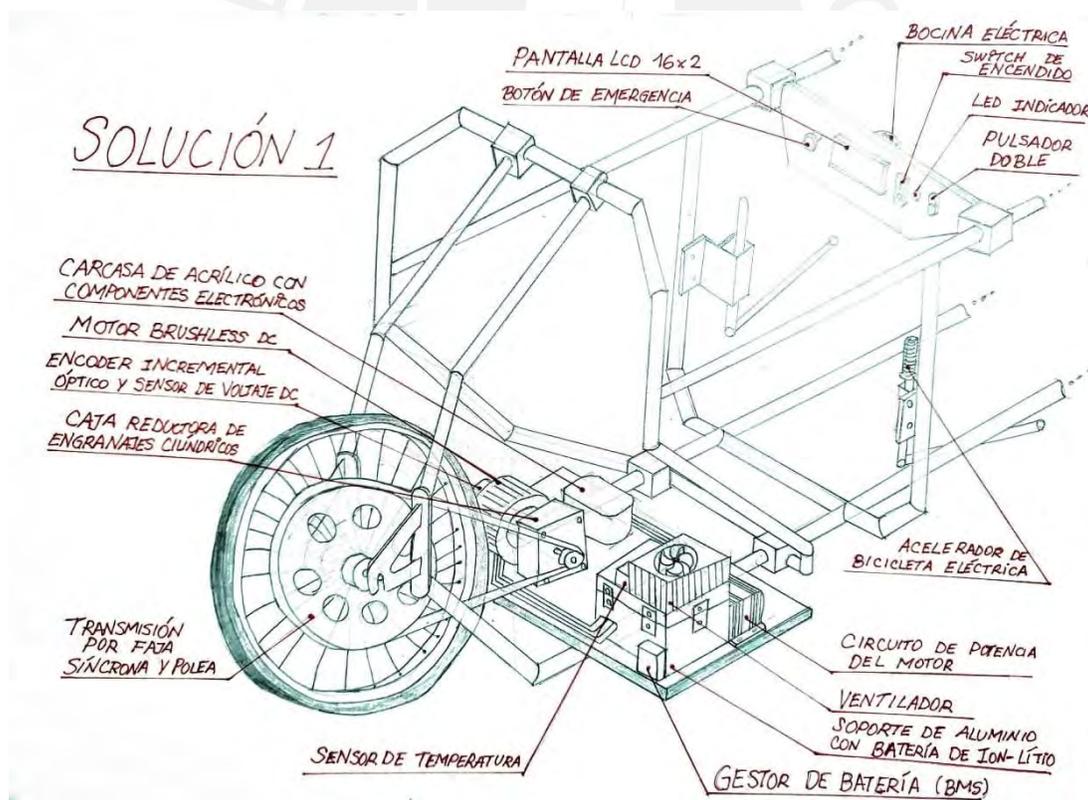


Figura 3.2. Concepto de solución 1 generalizado, chasis metálico y componentes electrónicos.
Fuente: Elaboración propia.

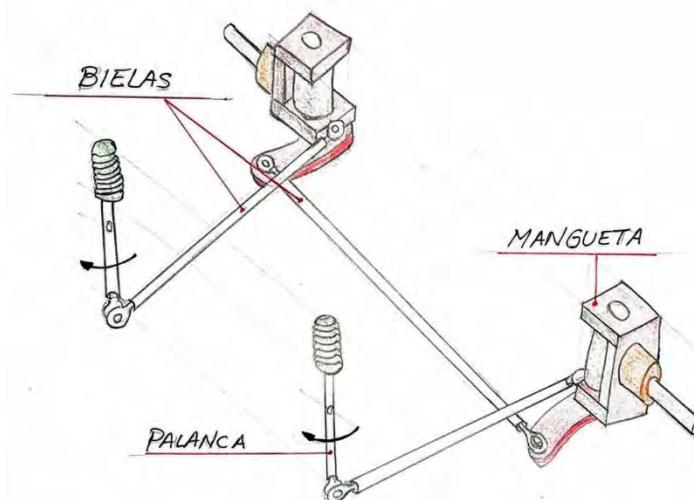


Figura 3.3. Concepto de solución 1, sistema de dirección.
Fuente: Elaboración propia.

3.5.2. Concepto de Solución 2

Se emplea un sistema de baterías de polímero de Litio con su respectivo circuito de potencia que permita alimentar a todos los sensores y actuadores, además de incluir su BMS (Battery Management System) para gestionar parámetros de la batería, como su carga. Además, se utilizará un encoder incremental magnético para registrar la velocidad del motor en rpm, un sensor de voltaje DC para medir la tensión en las bobinas del motor, un sensor de temperatura, un acelerador tipo pedal y un pulsador doble para el cambio de marcha. Luego, se empleará un motor Brushless DC acoplado en el aro de una llanta de bicicleta para todo el movimiento, también un diodo led como indicador en caso de problemas, la refrigeración se hará por aire a través de ventiladores de computadora y se utilizará una bocina eléctrica. Además, se utilizará un botón de apagado de emergencia, un switch on/off para encender y apagar el vehículo y una pantalla táctil TFT para la visualización de los parámetros dinámicos del prototipo. El controlador general será un computador de placa reducida, como lo puede ser una Raspberry Pi.

Por otro lado, el motor estará unido directamente al aro de bicicleta, por lo que no necesitará reducción de velocidad ni transmisión, o la transmisión se puede considerar los rayos del aro. La batería estará dentro de una caja metálica también unido al chasis

por uniones atornilladas. Además, los componentes electrónicos estarán en una carcasa transparente unida al chasis.

Finalmente, el chasis considerado es metálico monocasco, y el sistema de dirección es por varillas tipo kart, el elemento para mover este sistema de dirección es el timón, el cual estará unido a uniones no homocinéticas (unión cardánica) para conectar el timón al sistema de dirección.

La ventaja de esta solución es que es mucho más sencilla, ya que solo se utiliza un motor acoplado a la llanta y no requiere componentes mecánicos adicionales para elevar el torque, esto hace que el carro sea más ligero y tenga un mejor comportamiento dinámico en las curvas, además de que, gracias a que el vehículo tiene menos piezas mecánicas que puedan fallar, se aumenta el tiempo de vida del vehículo.

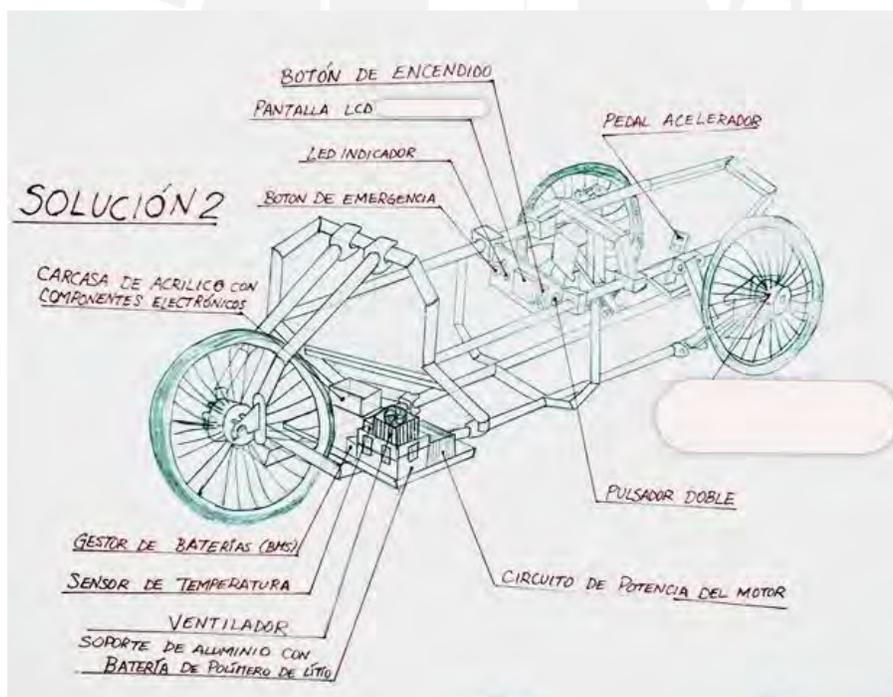


Figura 3. 4. Concepto de solución 2 generalizado, chasis metálico y componentes electrónicos.
Fuente: Elaboración propia.

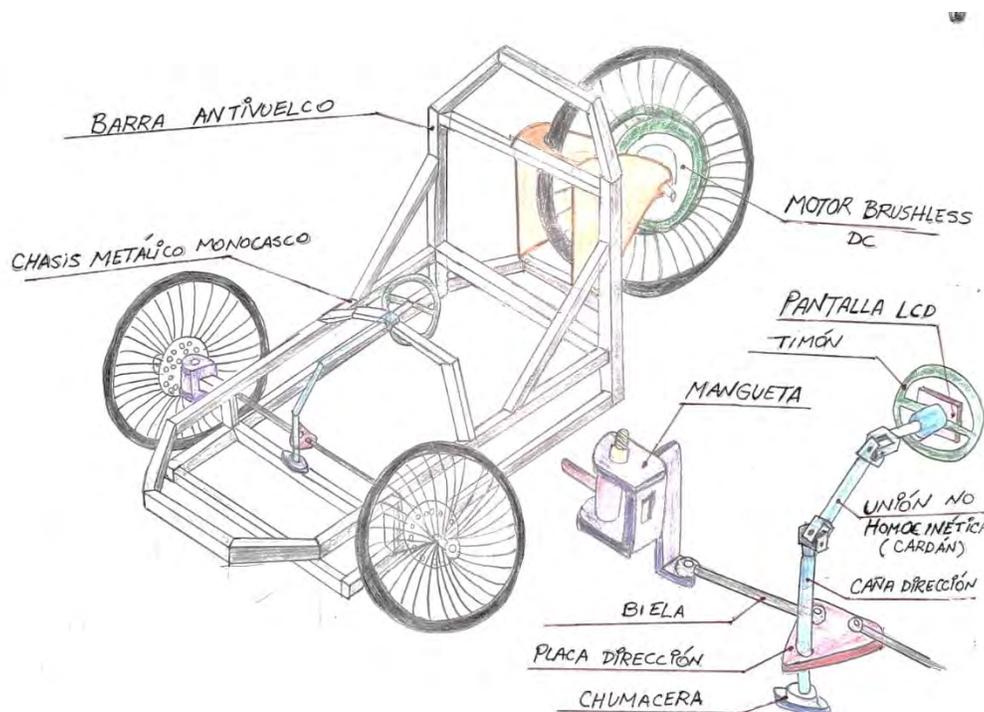


Figura 3.5. Concepto de solución 1 generalizado, chasis metálico y sistema de dirección.
Fuente: Elaboración propia.

3.5.3. Concepto de Solución 3

Por otro lado, el motor estará unido al chasis a través de un acople, la reducción de velocidad se hará por medio de una caja de engranajes planetarios y la transmisión será por medio de piñón y cadena. La batería estará dentro de una caja de aluminio también unido al chasis por uniones atornilladas. Además, los componentes electrónicos estarán en una carcasa transparente unida al chasis.

La ventaja de esta solución es que es la más barata de implementar, debido al Motor Asíncrono AC, ya que, si se considera una jaula de ardilla, suele ser barato y de bajo mantenimiento, la desventaja es que para la potencia necesaria suelen ser más grandes que los DC Brushless, lo que incrementaría el peso del vehículo y lo haría más lento. Por otro lado, la reducción por engranajes planetario es mucho mejor que la de engranajes cilíndricos, por ser más compacta, pero suele ser más cara de fabricar, lo

que podría incrementar el costo de toda la solución; del mismo modo el piñón y la cadena, que suelen ser más caros que el sistema por faja, y aun que transmiten más torque que la faja, suelen tener un mantenimiento más riguroso, adicionando sistema de dirección de piñón-cremallera, es más caro y requiere más mantenimiento que un sistema de dirección sencillo como los que se usan en los karts de competencias. Finalmente, hacer el chasis en fibra, dejaría como opción más lógica usar la fibra de carbono, material muy resistente, pero a la misma vez caro de implementar, lo cual termina de encarecer mucho esta solución solo en aspectos mecánicos.

Por otro lado, usar un PLC para un vehículo pequeño no es lo ideal, y es de 10 a 12 veces más caro que los microcontroladores presentados.

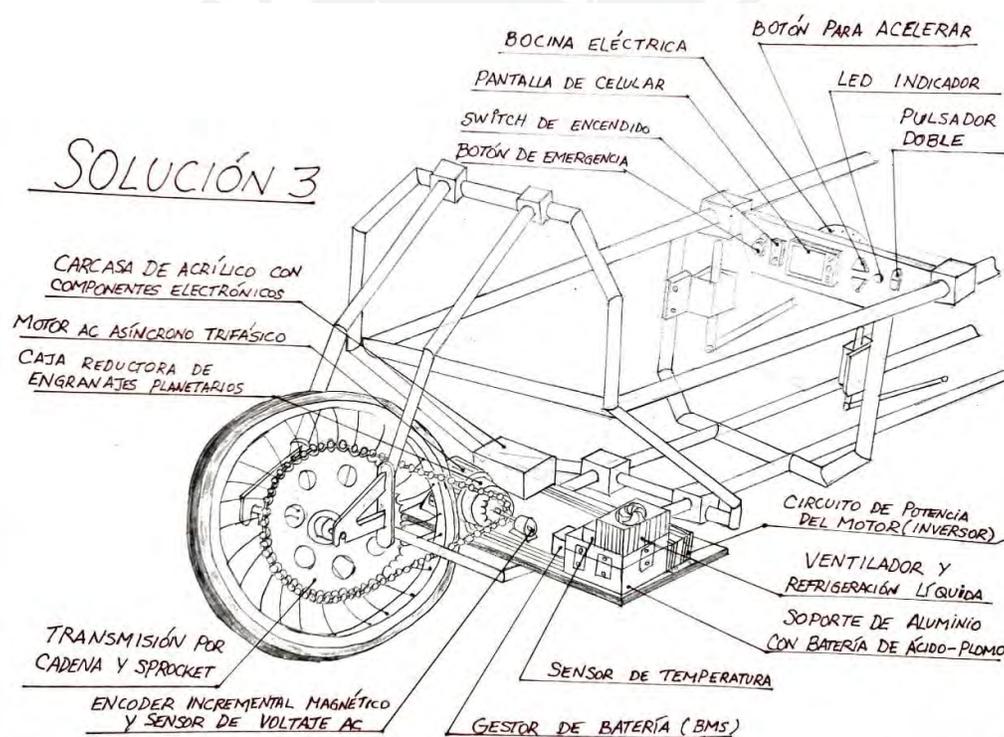


Figura 3.6. Concepto de solución 3 generalizado, chasis metálico y componentes electrónicos.

Fuente: Elaboración propia.

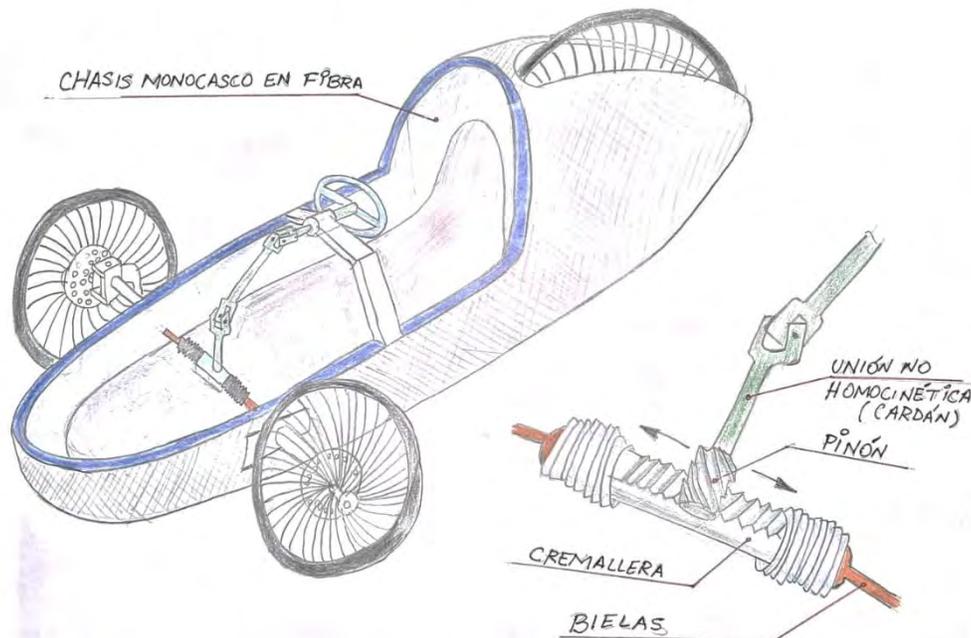


Figura 3.7. Concepto de solución 3 generalizado, chasis metálico y sistema de dirección.
Fuente: Elaboración propia.

3.6. Análisis Técnico – Económico

Para el análisis técnico se consideró los siguientes aspectos:

- Funcionalidad: Que tan eficientes puede ser la solución comparada con las demás.
- Diseño: Que tan fácil es de diseñar, considerando la resistencia mecánica que va a soportar la máquina.
- Seguridad: Que tan seguro puede ser la solución respecto al usuario que va a manejar.
- Ergonomía: Evalúa que la solución no incomode al piloto al momento de usar el vehículo.
- Montaje: Que tan fácil de implementar puede ser la solución respecto a las demás.

Tabla 3.1. Tabla de análisis técnico

VALOR TÉCNICO										
p: puntaje de 0 a 4 (Escala de valores según VDI 2225)										
0 = No satisface, 1 = Aceptable a las justas, 2 = Suficiente, 3 = Bien, 4 = Muy ideal										
g: es el peso ponderado y se da en función de la importancia de los criterios de evaluación										
Variantes de concepto/Proyectos			S1		S2		S3		Solución Ideal	
Nro.	Criterios de evaluación	g	p	gp	p	gp	p	gp	p	gp
1	Funcionalidad	4	3	12	4	16	4	16	4	16
2	Diseño	3	4	12	3	9	4	12	4	12
3	Seguridad	4	3	12	4	16	3	12	4	16
4	Ergonomía	3	2	6	4	12	3	9	4	12
5	Calidad	3	3	9	3	9	3	9	4	12
6	Montaje	2	2	4	3	6	2	4	4	8
Puntaje máximo			17	55	21	68	19	62	24	76
Valor técnico			0.72		0.89		0.82		1	
Orden			1		2		3			

Fuente: Elaboración propia

Para el análisis económico se consideró los siguientes aspectos:

- Eficiencia energética: Qué tan eficiente será el sistema escogido de modo que permita ahorrar dinero.
- Costo de la tecnología: Qué tan caro serán los componentes que comprar incluyendo el costo de transporte o envío.
- Costo de la estructura: Qué tan caro serán los componentes de la estructura a comprar incluyendo el transporte.

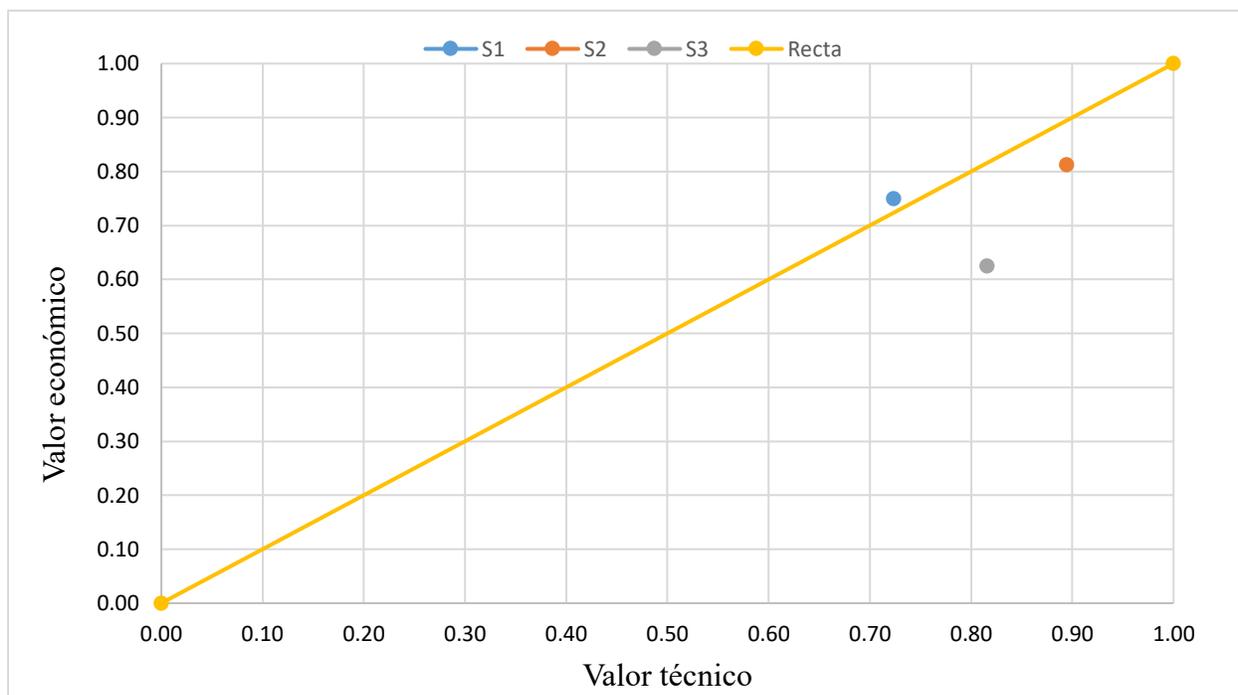
- Productividad: Qué tan fácil será la implementación del sistema, que permita una buena productividad al momento de implementarla.
- Costo de mantenimiento: Qué tan caro será hacerle mantenimiento a la máquina periódicamente.

Tabla 3.2. Tabla de análisis económico.

VALOR ECONÓMICO										
p: puntaje de 0 a 4 (Escala de valores según VDI 2225)										
0 = No satisface, 1 = Aceptable a las justas, 2 = Suficiente, 3 = Bien, 4 = Muy ideal										
g: es el peso ponderado y se da en función de la importancia de los criterios de evaluación										
Variantes de concepto/Proyectos		S1			S2		S3		Solución Ideal	
Nro.	Criterios de evaluación	g	p	gp	p	gp	p	gp	p	gp
1	Eficiencia energética	4	3	12	4	16	4	16	4	16
2	Costo de tecnología	4	3	12	3	12	2	8	4	16
3	Costo de estructura	3	3	9	3	9	1	3	4	12
4	Productividad	3	3	9	3	9	3	9	4	8
5	Costo de mantenimiento	2	3	6	3	6	2	4	4	12
Puntaje máximo			15	48	16	52	12	40	20	64
Valor técnico			0.75		0.81		0.63		1	
Orden			1		2		3			

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.1. Gráfico técnico – económico



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se concluye que la Solución 2 es la mejor según el diagrama, después le seguiría la Solución 1, la cual se implementará si es que se ven grandes dificultades en la Solución 2.

CAPÍTULO 4

DISEÑO PREMILINAR

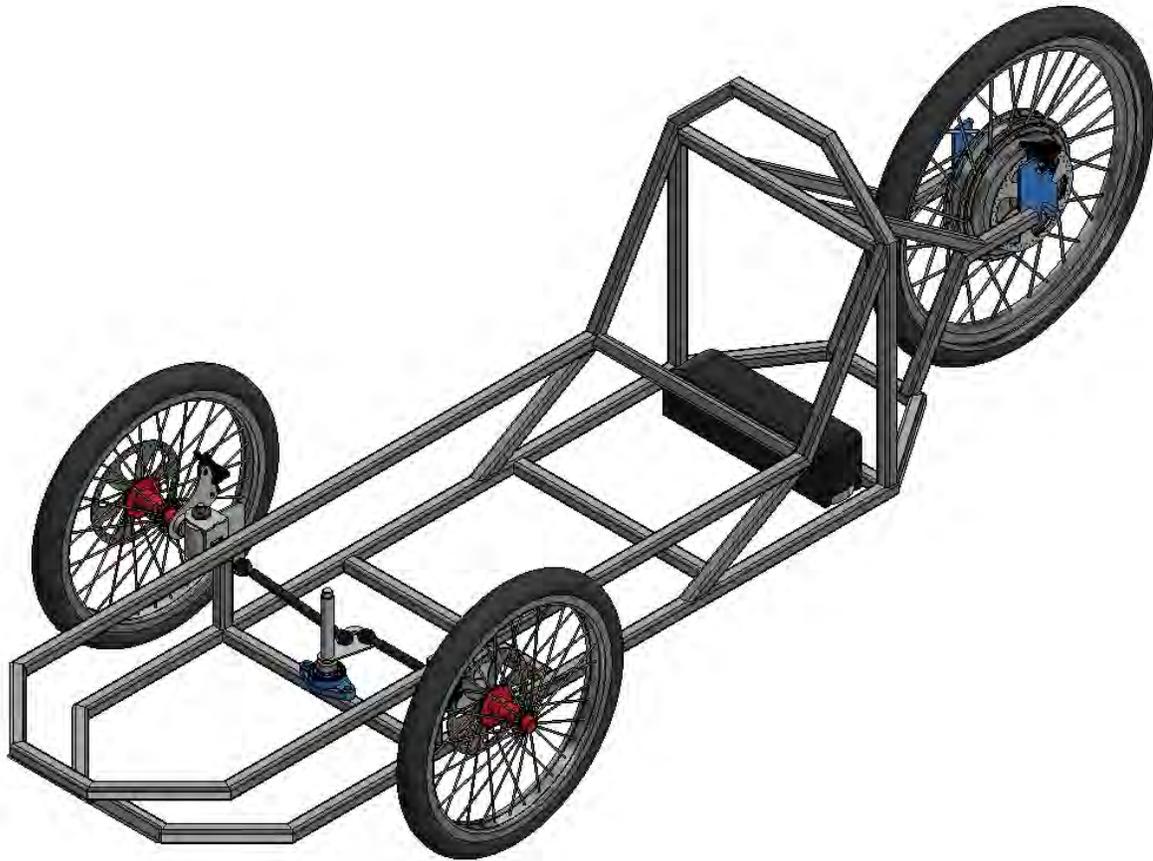
El presente capítulo mostrará información relacionada respecto al diseño preliminar. Luego de escoger el diseño de solución óptimo, se identificaron y corrigieron problemas que tubo el diseño de solución óptimo, de modo que se pueda tener un diseño preliminar mejorado. Además, se presentará una propuesta de arquitectura de hardware.

4.1. Proyecto preliminar

Como se mencionó en el capítulo anterior, la solución ganadora es la número 2, debido a la sencillez de esta y la confiabilidad de los elementos. Adicionalmente a ello, la solución 2 se debe complementar con la Lista de requerimientos, descrita en el Anexo 1, la cual resume las reglas de la competencia que deben estar presentes en el vehículo.

Mediante el uso del software Autodesk Inventor 2020 para diseño asistido por computadora, se realizó un bosquejo en 3D respetando las dimensiones principales exigidas por las reglas, la distancia entre ejes del vehículo es de 1 500 mm, el ancho de vía es de 715 mm, la altura es de 703

mm y una relación entre la altura entre el ancho de vía es de 0,98 , mucho menor que el máximo exigido que es de 1,25.



*Figura 4.1. Proyecto preliminar diseñado con software CAD Inventor.
Fuente: Elaboración propia.*

4.2. Arquitectura de Hardware

La arquitectura de hardware, mostrada en la Figura 4.2, muestra los principales componentes eléctricos y mecánicos que formarán parte del sistema del vehículo. Según la Figura 4.2, los bloques de color fucsia pertenecen al dominio de control, los cuales reciben información de los sensores (bloque amarillo) y el interfaz, y se encargan de interpretarla para enviar órdenes a los actuadores (bloque) o al mismo interfaz (bloque gris). Los actuadores lo componen el motor eléctrico principalmente y otros accesorios encargados de que el sistema funcione dentro de su rango estable y no haya excesos en el manejo de energía, como puede ser en la batería, ya que, si

la temperatura se excede, puede llegar a incinerarse. Además, a lo anterior lo complementan los sensores, los cuales recogen información del sistema y lo envían al controlador para que este pueda manejar todo a través de sus actuadores. Entonces, el dominio eléctrico-electrónico lo componen los sensores, actuadores, el interfaz y la batería. Por otro lado, el bloque naranja corresponde al dominio mecánico, el cual está conformado por el sistema de transmisión de la potencia mecánica del motor a la rueda.

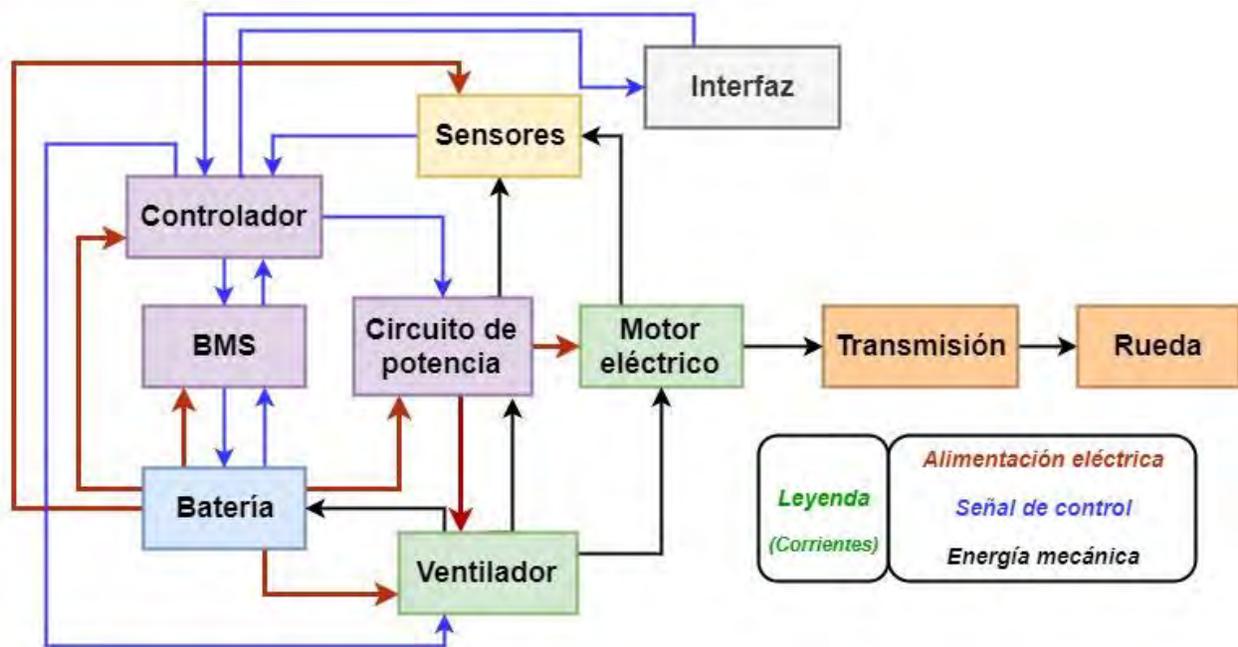


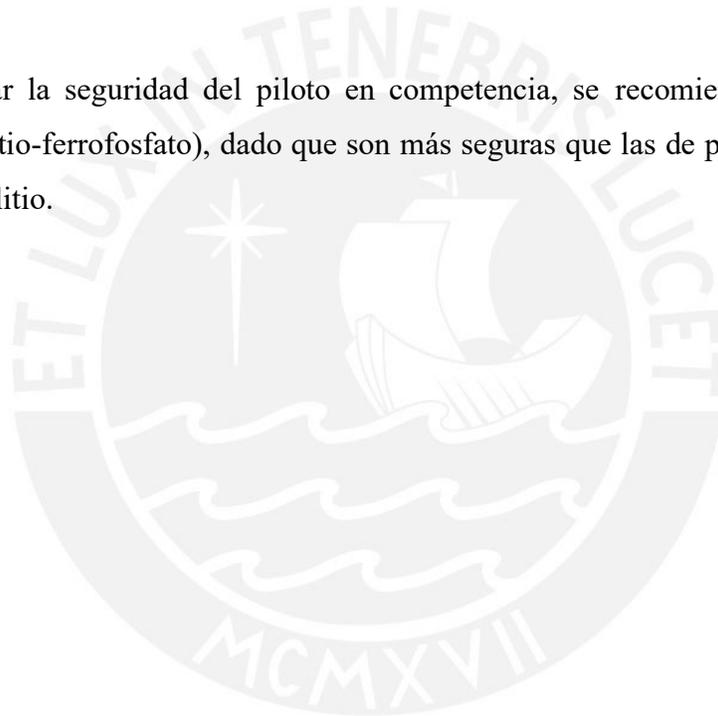
Figura 4.2. Arquitectura de hardware de los componentes del sistema de propulsión eléctrica del vehículo.
Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. La propuesta de solución relacionada a la parte mecánica, en primera instancia, cumple con la lista de requerimientos, la cual se realizó en base a las reglas de la competencia y se diseñó un proyecto preliminar tomando como referencia diseños de prototipos eléctricos de la competencia.
2. Se pudo diseñar la arquitectura de hardware en base a los requerimientos planteados por las reglas de la competencia, a la arquitectura usada en vehículos eléctricos comerciales y tomando como referencia vehículo eléctricos prototipo que participaron en la competencia.
3. El diseño preliminar se basó en el concepto de solución 2 por ser la más barata, al usar un motor brushless acoplado directamente al aro y usar actuadores sencillos que pueden adquirirse todo junto al comprar un kit de bicicleta eléctrica, lo cual lo hace una solución sencilla de acoplar, con pocas piezas que reparar y fácil de trasladar.

RECOMENDACIONES

1. Para mejorar el diseño mecánico propuesto en proyecto preliminar, se recomienda validar la estructura y los demás componentes usando perfiles de aluminio, de modo que se logra reducir el peso, conservando propiedades mecánicas necesarias para el vehículo.
2. Para facilitar el transporte del vehículo, se recomienda usar uniones atornilladas en componentes grandes del vehículo, de modo que permita que pueda ensamblarse y desensamblarse en cualquier momento.
3. Para mejorar la seguridad del piloto en competencia, se recomienda usar baterías de LiFePO₄ (litio-ferrofosfato), dado que son más seguras que las de polímero de litio o las de iones de litio.



ANEXOS

Anexo 1: Lista de Exigencias

LISTA DE EXIGENCIAS			Pág. 1 de
			Edición: Revisión 1
PROYECTO:		Diseño del Chasis, Dirección y sistema de propulsión eléctrica para un vehículo de la categoría prototipo enfocado en la competencia Shell Eco Marathon 2020	Fecha: 17/09/2019
CLIENTE:		Pontificia Universidad Católica del Perú	Elaborado: 17/09/2019
Fecha (cambios)	Exigencia o Deseo	Descripción	Responsable
Función Principal			
28/09/2020	E	Diseñar el Chasis, Dirección, sistema de propulsión eléctrico para un vehículo de la categoría prototipo, con miras a que el grupo Newro pueda participar en la competencia Shell Eco Marathon.	Diego Tarazona
Geometría			
21/09/2019	E	Las dimensiones del sistema electromotriz no deben sobrepasar: 700 mm de largo, 500 mm de ancho y 400 mm de altura.	Diego Tarazona
28/09/2020	E	El chasis debe ser monocasco con una altura máxima de 1000 mm, una anchura entre llantas mínima de 500 mm y máxima de 1300 mm y una longitud total máxima de 3500 mm.	Diego Tarazona
28/09/2020	E	La distancia entre ejes del vehículo debe ser de al menos 1000 mm y la relación de altura dividida entre el ancho de vía debe ser inferior a 1,25.	Diego Tarazona
Cinemática			
21/09/2019	E	La velocidad el vehículo prototipo no debe exceder los 40 km/h.	Diego Tarazona
28/09/2020	E	Las ruedas directrices tienen que ser las delanteras, con un radio de giro de 8m o menos	Diego Tarazona
28/09/2020	E	Debe haber dos sistemas de frenado hidráulico por eje, delantero y trasero, que puedan funcionar independientemente.	Diego Tarazona
Fuerza			
21/09/2019	E	La fuerza aproximada para mover el vehículo desde el reposo es de 850 N.	Diego Tarazona
Energía			

21/09/2020	E	Número máximo de motores permitidos es 2 con sus unidades de control asociadas.	Diego Tarazona
21/09/2019	E	La batería eléctrica para vehículos prototipo debe ser de iones de Litio.	Diego Tarazona
21/09/2019	E	Es permitido solo una batería eléctrica por vehículo de máximo 1000 Wh	Diego Tarazona
21/09/2019	E	La fuente de alimentación debe ser por batería eléctrica de 48 voltios nominales o 60 voltios máximos.	Diego Tarazona
Señales (Información)			
21/09/2019	E	Entrada: señal de encendido, apagado, parada de emergencia para el vehículo, acelerador y bocina eléctrica.	Diego Tarazona
21/09/2019	E	Salida: Estado actual de parámetros dinámicos del vehículo mediante señales visuales como velocidad, energía, etc.	Diego Tarazona
21/09/2019	E	Apagar del vehículo en caso de detectarse que el dispositivo electrónico de seguridad hombre muerto está desactivado.	Diego Tarazona
21/09/2020	D	Usar un kit de comunicación por radio en el que el piloto no tenga que intervenir para activarlo.	Diego Tarazona
Control			
21/09/2019	E	Es obligatorio un sistema de gestión de batería (BMS) compatible con la batería.	Diego Tarazona
21/09/2020	E	El controlador debe diseñarse especialmente para la competencia.	Diego Tarazona
21/09/2022	E	Control del estado de carga de las baterías durante la competencia.	Diego Tarazona
21/09/2019	E	Control del voltaje entregado al motor en relación con la velocidad que se espera tener.	Diego Tarazona
21/09/2019	D	Control de la velocidad y aceleración del vehículo, de modo que se disminuya el error entre la velocidad entregada por el acelerador y la medida en la rueda.	Diego Tarazona
Software			
21/09/2019	E	El software usado para el diseño del controlador y de la interfaz debe ser libre.	Diego Tarazona
Seguridad			
28/09/2020	E	El vehículo prototipo debe tener una zona mínima de deformación de 100 mm entre la parte delantera de la carrocería del vehículo y los pies del conductor.	Diego Tarazona

28/09/2020	E	El vehículo debe tener una barra antivuelco efectiva que se extienda 50 mm alrededor del casco y extenderse más lejos de los hombros del conductor en su posición de manejo.	Diego Tarazona
28/09/2020	E	La barra antivuelco debe ser capaz de soportar una carga estática de 700N aplicada en dirección vertical, horizontal y/o perpendicular sin deformarse en ninguna dirección.	Diego Tarazona
28/09/2020	E	El vehículo debe tener un mamparo rígido que aisle al sistema de propulsión eléctrica del conductor.	Diego Tarazona
28/09/2020	E	El vehículo debe tener un piso que evite que cualquier parte del cuerpo entre en contacto con el suelo.	Diego Tarazona
28/09/2021	E	El vehículo debe contar con al menos 5 puntos de montaje para un arnés de seguridad.	Diego Tarazona
21/09/2020	E	Unir todos los objetos al vehículo de manera segura y rígida, sin cordones elásticos.	Diego Tarazona
21/09/2018	E	Todos los circuitos eléctricos deben estar protegidos ante un cortocircuito por fusibles u otro método.	Diego Tarazona
21/09/2019	E	Todos los cableados eléctricos deben estar ordenados, en buenas condiciones, claramente etiquetados y de fácil acceso.	Diego Tarazona
28/09/2021	E	La bocina eléctrica (claxon) debe estar colocado en la parte delantera y debe emitir un sonido superior a 85 dBA medido 4 metros delante del vehículo.	Diego Tarazona
28/09/2021	E	Botón de apagado de emergencia interior (puede ser un switch efectivo).	Diego Tarazona
28/09/2021	E	Botón de apagado de emergencia exterior en la parte trasera del vehículo e instalado en una parte no desmontable (tiene que ser un botón rojo de cierre).	Diego Tarazona
21/09/2019	E	La batería del vehículo debe estar ubicada en la parte trasera del auto.	Diego Tarazona
21/09/2021	E	Los mecanismos de transmisión de potencia del vehículo deben estar protegidos	Diego Tarazona
21/09/2022	E	Proporcionar protección de carga a la batería, dentro y fuera del vehículo	Diego Tarazona
21/09/2023	E	Bornes positivos y negativos de la batería deben estar aislados de la carrocería u otro componente metálico.	Diego Tarazona
21/09/2023	E	La batería debe estar equipada con un montaje de metal para evitar incendio total del vehículo en caso se incinere la batería	Diego Tarazona
Comunicación			

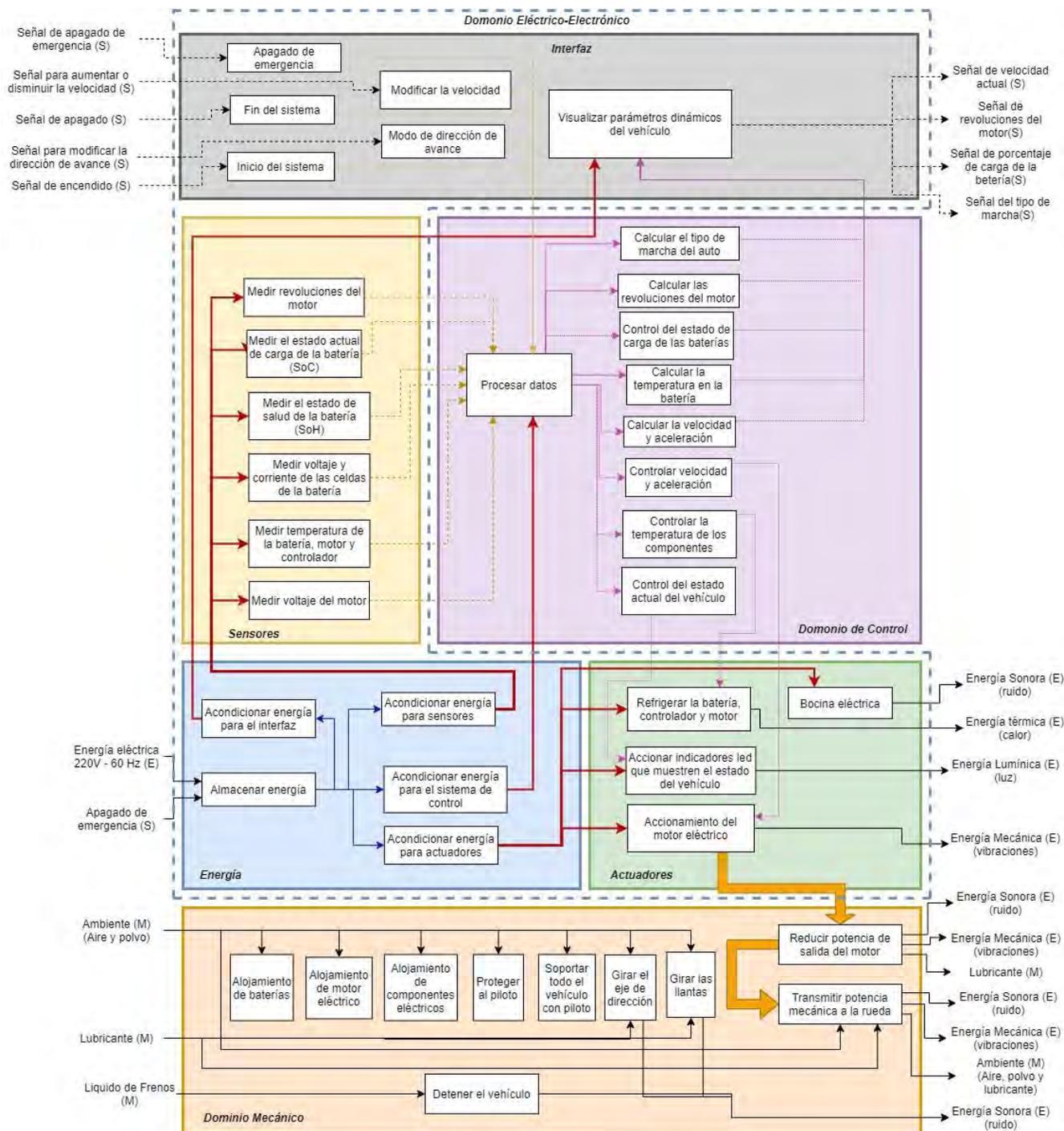
21/09/2021	E	Garantizar que el sistema eléctrico sea compatible con el sistema de telemetría evitando ruido eléctrico.	Diego Tarazona
Ergonomía			
21/09/2018	E	Todas las cajas eléctricas deben estar hechos de material transparente para facilitar su inspección.	Diego Tarazona
21/09/2019	E	El compartimiento de energía (motor, baterías y controlador) deben ser de fácil acceso	Diego Tarazona
Fabricación			
21/09/2019	E	El vehículo contará con un diseño modular.	Diego Tarazona
28/09/2020	E	El vehículo prototipo debe contar con 3 ruedas en constate contacto con la carretera	Diego Tarazona
28/09/2020	E	El vehículo debe estar fabricado de tal manera que permita la visión hacia adelante y a 90° a cada lado del eje longitudinal del vehículo.	Diego Tarazona
Montaje			
21/09/2019	E	El tiempo de montaje y desmontaje del sistema eléctrico motriz del vehículo debe ser menor a 2 horas.	Diego Tarazona
Uso			
21/09/2019	E	El vehículo debe diseñarse para ser usado por un usuario que tenga conocimientos básicos sobre motores eléctricos y conducción.	Diego Tarazona
28/09/2020	E	El vehículo debe ser diseñado para que el piloto pueda arrancar el vehículo en menos de 20 segundos.	Diego Tarazona
28/09/2020	E	El vehículo debe ser diseñado para que el piloto pueda abandonar el prototipo en menos de 10 segundos.	Diego Tarazona
28/09/2020	E	El vehículo debe diseñarse para ser usado en la competencia Sell Eco-marathon, respetando las reglas establecidas por Shell para el año 2020.	Diego Tarazona
Mantenimiento			
21/09/2019	E	Realizar una limpieza mensual profunda de los componentes electrónicos del vehículo para garantizar su buen funcionamiento.	Diego Tarazona
21/09/2019	E	El mantenimiento del vehículo no debe durar más de 2 horas.	Diego Tarazona
Costo			
21/09/2019	E	Los costos de los materiales y fabricación no excederán los 15 000 soles.	Diego Tarazona
28/09/2020	E	El costo de diseño será aproximadamente de 4 000 soles.	Diego Tarazona
Plazos			

28/09/2020	E	La entrega del diseño final del vehículo debe entregarse en el mes de diciembre 2020	Diego Tarazona
------------	---	--	----------------

Fuente: Elaboración propia.



Anexo 2: Lista de Exigencias



Fuente: Elaboración propia.

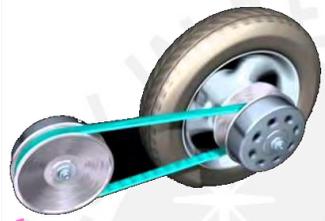
Anexo 3: Matriz morfológica

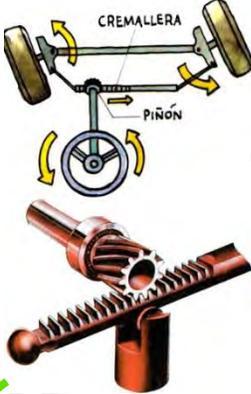
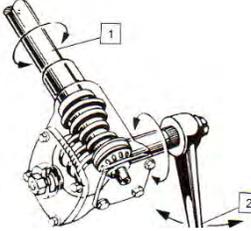
Leyenda de indicadores para la matriz morfológica

Leyenda	Solución 1	Solución 2	Solución 3
			

Dominio Mecánico:

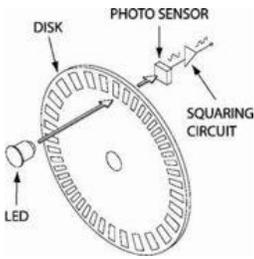
	Funciones Parciales	Solución 1	Solución 2	Solución 3
DOMINIO MECÁNICO	Alojar el motor	Unido directo al chasis 	Aro de bicicleta 	
	Alojar la batería	Caja metálica unida al chasis 		
	Alojar los componentes electrónicos	Carcasa transparente 		

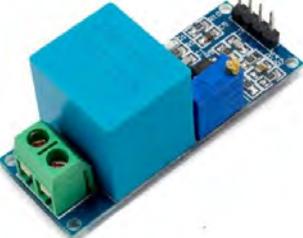
<p>Reductor de velocidad</p>	<p>Engranajes cilindricos</p> 	<p>Engranajes planetarios</p> 	<p>Sin reductor de velocidad</p>
<p>Transmitir potencia mecánica a la rueda</p>	<p>Faja</p> 	<p>Rayos de aro de bicicleta</p> 	<p>Cadena</p> 
<p>Protección del piloto</p>	<p>Reglas de la competencia</p>  <p>SHELL ECO-MARATHON 2020 OFFICIAL RULES (CHAPTER 1)</p>		
<p>Soportar todo el vehículo</p>	<p>Chasis metálico monocasco</p> 	<p>Chasis en base de fibra monocasco</p> 	

Girar las llantas	<p>Dirección por varillas tipo kart</p> 	<p>Dirección por piñón y cremallera</p> 	<p>Dirección por tornillo sin fin - corona</p> 
	<p>Girar el eje de dirección</p>	<p>Timón</p> 	<p>Varillas direccionales</p> 

Fuente: Elaboración propia.

Dominio Electrónico:

	Funciones Parciales	Solución 1	Solución 2	Solución 3
E N E R G Í A	Almacenar energía	Batería de Ion-Litio 	Batería de Polímero de Litio 	Batería de Ácido-Plomo 
	Acondicionar energía	Circuito de potencia 		
	Censar estados de la batería (SoC, SoH, voltaje y corriente)	BMS 		
	Medir revoluciones del motor	Encoder incremental óptico 	Encoder incremental magnético 	Tacómetro 

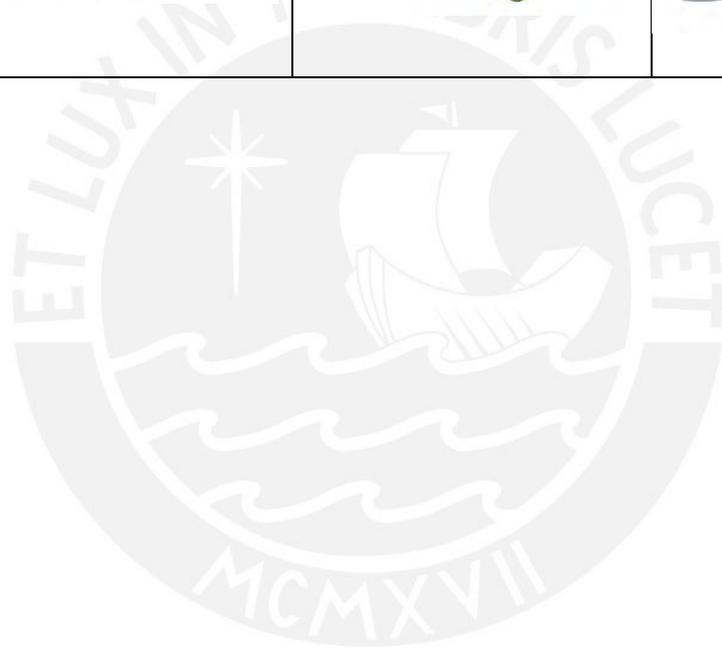
S E N S O R E S	<p>Medir voltaje del motor</p> <p>Sensor de voltaje DC</p> 	<p>Sensor de Voltaje AC</p> 		
	<p>Medir temperatura de la batería, motor y controlador</p> <p>Sensor de temperatura</p> 			
	<p>Medir cambio de velocidad</p> <p>Acelerador de bicicleta Eléctrica</p> 	<p>Pedal acelerador con potenciómetro</p> 	<p>Botones para acelerar</p> 	
	<p>Medir cambio de marcha</p> <p>Pulsador doble</p> 			

A C T U A D O R E S	Accionamiento del motor eléctrico	<p>Motor Brushless</p> 	<p>Motor Brushless en el aro</p> 	<p>Motor AC asíncrono trifásico</p> 
	Accionamiento de indicadores led	<p>Diodo led</p> 		
	Refrigeración de la batería, motor y controlador	<p>Refrigeración por aire</p> 	<p>Refrigeración por aire y líquida</p> 	

	Bocina eléctrica	<p>Bocina eléctrica de triciclos</p> 		
I N T E R F A Z	Apagado de Emergencia	<p>Botón de apagado de emergencia</p> 		
	Encendido y fin del sistema	<p>Switch on/off</p> 		
	Visualización de parámetros dinámicos del vehículo	<p>Pantalla LCD 16x2</p> 	<p>Pantalla Táctil TFT</p> 	<p>Pantalla de celular</p> 

Dominio de Control:

	Funciones Parciales	Solución 1	Solución 2	Solución 3
C O N T R O L	Procesamiento de datos	Microcontrolador 	Miniordenador 	PLC 



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aparicio, F., Vera, C., & Díaz, V. (2001). *Teoría de Los vehículos automóviles* (pp. 1–553). pp. 1–553. Madrid.
- Arduino Store. (n.d.). ARDUINO UNO REV3. Retrieved from <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>
- Carmeli, M. S., Castelli-Dezza, F., Galmarini, G., Mastinu, G., & Mauri, M. (2014). A urban vehicle with very low fuel consumption: Realization, analysis and optimization. *2014 9th International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies, EVER 2014*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/EVER.2014.6844113>
- Chau, K. T. (2015). *Electric Vehicle Machines and Drives: Design, Analysis and Application* (First Edit). Ltd., © 2015 John Wiley & Sons Singapore Pte.
- Ehsani, M., Gao, Y., & Emadi, A. (2009). *Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles Second Edition*. CRC Press.
- Espressif Systems. (2019). ESP32 Series Datasheet. *Espressif Systems*, 1–61. Retrieved from https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf
- Howlader, A. H., Chowdhury, N. A., Faiter, M. M. K., Touati, F., & Benammar, M. A. (2014). Development of energy efficient battery electric car for Shell Eco-Marathon competition - Qatar University experience. *2014 9th International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies, EVER 2014*. <https://doi.org/10.1109/EVER.2014.6844148>
- Infineon. (2019). *Motor control shield with IFX007T For Arduino*. Munich, Germany: 23/11/2019.
- Jazar, R. N. (2014). Vehicle Dynamics Theory and Application. In *SAE Technical Papers* (Second). <https://doi.org/10.4271/620572>
- Julián, D., Patarroyo, R., Alexander, R., Porrás, G., Felipe, A., & Fajardo, C. (2015). Sistemas de gestión de baterías (bms) y su importancia para los sistemas de almacenamiento de baterías (bess). *Tecnura, 19*, 51–56. <https://doi.org/10.14483/22487638.9608>
- Murias, D. (2010). Historia de los coches eléctricos. Retrieved November 23, 2019, from Motorpasion Webpage website: <https://www.motorpasion.com/coches-hibridos-alternativos/historia-de-los-coches-electricos>
- Oma, O. J. (2017). *Development , Building and Competing with a New Car in Shell Eco-marathon Bård Dagestad Carlsen Odin Jul Oma*. (June).
- Padrón Javbib, F. A. (2013). *Manual de Baterías y Acumuladores*. 1–34. Retrieved from

[https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/1536/MANUAL DE BÚSQUEDA RÁPIDA PARA BATERÍAS.pdf?](https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/1536/MANUAL_DE_BÚSQUEDA_RÁPIDA_PARA_BATERÍAS.pdf?)

PJRC. (n.d.). Teensy 3.2 & 3.1 - New Features. Retrieved from <https://www.pjrc.com/teensy/teensy31.html>

Raspberry Pi Foundation. (2016). Raspberry Pi 3 Model B+ Datasheet. *Datasheet*, 5. Retrieved from <https://static.raspberrypi.org/files/product-briefs/Raspberry-Pi-Model-Bplus-Product-Brief.pdf>

Rodriguez-ponce, R. (2019). *El encoder óptico : funcionamiento , fallas y correcciones*. (July).

Rodriguez Hernández, J., & Hermoza Llanos, E. (n.d.). *Análisis y diseño de mecanismos*.

SeedStudio. (2018). Brushless Motor Shield (TB6605FTG). Retrieved November 23, 2019, from <http://wiki.seeedstudio.com/Brushless-Motor-Shield-TB6605FTG/>

Shell Eco-marathon. (2020). *Shell Eco-Marathon 2020 Official Rules Chapter I* (p. 47). p. 47. Retrieved from https://base.makethefuture.shell/en_gb/service/api/home/shell-eco-marathon/global-rules/_jcr_content/root/content/document_listing/items/download_1733386233.stream/1598973488368/0e057b48fe5e2adc044ac860f83ebf26f8ccd5f9/shell-eco-marathon-2020-official-rul

Texas Instruments. (2014). *Tiva™ TM4C123GH6PM Microcontroller Data Sheet*. 1–1409. Retrieved from <http://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/spms376e/spms376e.pdf>

Vega, A., & Fabelo, H. (2014). *Diseño de un Sistema de Gestión de Baterías (BMS)*.