



Caracterización de las fuerzas del vehículo eléctrico visto desde su dinámica para su optimización

Characterization of the forces of the electric vehicle seen from its dynamics for its optimization

Caracterização das forças do veículo elétrico vistas desde sua dinâmica para sua otimização

Jairo Edison Guasumba Maila^I

jguasumba@tecnoecuadoriano.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-0533-0397>

Cordovez Nogales Steeven Joselito^{III}
steevencordovez1997@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-3189-074X>

Víctor Alfonso Garay Cisneros^{II}

vgaray@tecnoecuadoriano.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-6739-9309>

Cuenca Jaramillo William Andrés^{III}

williamlumia93@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-6178-983X>

Correspondencia: jguasumba@tecnoecuadoriano.edu.ec

Ciencias de la Técnicas y Aplicadas
Artículos de investigación

***Recibido:** 16 de julio de 2021 ***Aceptado:** 30 de agosto de 2021 * **Publicado:** 08 de septiembre de 2021

- I. Magíster en Diseño Mecánico, Docente Investigador, Coordinador de Carrera de Mecánica y Electromecánica Automotriz, Instituto Superior Tecnológico Tecnoecuadoriano, Ecuador.
- II. Magister en Educación Mención Gestión del Aprendizaje. Mediado por Tic, Docente investigador. Director de Vinculación con la sociedad, Miembro del Consejo Académico Superior ISTTE, Instituto Superior Tecnológico Tecnoecuadoriano, Ecuador.
- III. Participante Investigador, Estudiante Tecnología Superior en Electromecánica Automotriz, Instituto Superior Tecnológico Tecnoecuadoriano, Ecuador.
- IV. Participante Investigador, Estudiante Tecnología Superior en Electromecánica Automotriz, Instituto Superior Tecnológico Tecnoecuadoriano, Ecuador.

Resumen

En la actualidad, un sistema de propulsión eléctrico debe estar bien diseñado para minimizar la pérdida de energía y, en última instancia, aumentar su autonomía sin aumentar el peso de la batería. Para reducir el tiempo y los costos de diseño, se puede utilizar un enfoque de diseño basado en modelos. Por este motivo se expone varias variables en relación con el modelo de vehículo eléctrico que se adecue a las necesidades geográficas y topográficas de la localidad a implementarse sin dejar de perder de vista la eficiencia de los sistemas eléctricos para su mayor durabilidad. En conclusión, el modelo dinámico de las fuerzas que tienen interacción en el vehículo se evalúa para la aproximación de la energía, potencia, par y velocidad necesarios de nuestro vehículo eléctrico que dependerá de los sistemas y las pérdidas que aparezcan en el modelo propuesto para conseguir un diseño lo más eficiente posible para una movilidad sostenible.

Palabras clave: Dinámica de vehículos; arquitectura de transmisión de vehículos eléctricos; vehículo eléctrico; equilibrio de fuerzas; tren de potencia eléctrico.

Abstract

Today, an electric powertrain must be well designed to minimize power loss and ultimately increase its range without increasing the weight of the battery. To reduce design time and costs, a model-based design approach can be used. For this reason, several variables are exposed in relation to the electric vehicle model that adapts to the geographical and topographic needs of the locality to be implemented without ceasing to lose the efficiency of the electrical systems for their greater durability. In conclusion, the dynamic model of the forces that interact in the vehicle is evaluated to approximate the energy, power, torque, and speed necessary for our electric vehicle, which will depend on the systems and losses that appear in the proposed model to achieve a design as efficient as possible for sustainable mobility.

Keywords: Vehicle dynamics; electric-vehicle drivetrain architecture; electric vehicle; balance of forces; electric powertrain.

Resumo

Hoje, um trem de força elétrica deve ser bem projetado para minimizar a perda de energia e, por fim, aumentar seu alcance sem aumentar o peso da bateria. Para reduzir o tempo e os custos de design, uma abordagem de design baseada em modelo pode ser usada. Por este motivo, várias variáveis estão expostas em relação ao modelo do veículo elétrico que se adapta às necessidades geográficas e topográficas da localidade a ser implementado sem deixar de perder a eficiência dos sistemas elétricos pela sua maior durabilidade. Em conclusão, o modelo dinâmico das forças que interagem no veículo é avaliado para aproximar a energia, potência, torque e velocidade necessários para o nosso veículo elétrico, que dependerá dos sistemas e perdas que aparecem no modelo proposto para alcançar um projeto tão eficiente quanto possível para uma mobilidade sustentável

Palavras-chave: Dinâmica do veículo; arquitetura de transmissão de veículos elétricos; veículo elétrico; equilíbrio de poder; trem de força elétrica.

Introducción

El impacto de los vehículos eléctricos (VE) se está disparando progresivamente en la vida diaria. Este impacto está abriendo el camino para los esfuerzos de investigación relacionados con cada componente de los sistemas de propulsión de los vehículos eléctricos, es decir, el motor eléctrico, el paquete de baterías y el sistema electrónico de potencia (Gómez Vilchez & Jochem, 2019). Los combustibles líquidos más actuales y populares son los combustibles fósiles; sin embargo, incluso según estimaciones conservadoras, el agotamiento de las reservas de petróleo se producirá en los próximos 35 años (Üstün et al., 2018). Para lograr la hoja de ruta energética europea 2050 [1] “La UE se compromete a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a un 80-95% por debajo de los niveles de 1990 para 2050 en el contexto de las reducciones necesarias por parte de los países desarrollados como grupo”. En el sector del transporte, los vehículos eléctricos (VE) son un medio importante para asegurar los objetivos de reducción de emisiones de GEI. sin embargo, el aumento de las inversiones en energía renovable desafía en los sistemas de energía debido a la intermitente recursos (Hu et al., 2016)

La demanda de movilidad sostenible y respetuosa con el medio ambiente está ejerciendo presión sobre la industria automotriz para que avance hacia vehículos más limpios y eficientes desde el punto de vista energético. Las arquitecturas actuales de vehículos de combustión interna (ICEV)

se estresan en todos los niveles para lograr mejoras; sin embargo, las barreras tecnológicas son cada vez más se están reduciendo, y eventualmente avances significativos y, por lo tanto, nuevas soluciones. Los vehículos eléctricos (EV) se ajustan mejor al objetivo futuro de las "ciudades ecológicas" debido a factores como la movilidad sin contaminación, pero surgen grandes preocupaciones con respecto a las infraestructuras de carga, la disponibilidad de energía de fuentes renovables, el reciclaje de baterías y el alcance del cliente (Holjevac et al., 2020) Por todas las razones anteriores, el mercado de la automoción está impulsando cada vez más vehículos eléctricos, híbridos o totalmente eléctricos (Bayar, 2020)

La optimización del diseño es un método para mejorar el diseño de productos futuros bajo restricciones agravadas como la disminución de los tiempos del ciclo de vida del producto, el aumento del número de derivados o el aumento de la complejidad de los productos. La investigación a nivel de componentes a menudo conduce a resultados que sugieren un determinado concepto de propulsión, que puede tener ventajas con respecto a un determinado componente (motor, transmisión, inversor,...) o una determinada propiedad (eficiencia, coste, peso,...) (Angerer et al., 2018). La gestión de la energía entre los diferentes componentes del vehículo es particularmente crucial, la potencia a bordo de la fuente debe proporcionar al mismo tiempo suficiente energía para autonomía del vehículo y entregan una potencia significativa durante fases transitorias correspondientes a aceleración o frenado. La presencia de un sistema de almacenamiento de energía a bordo. el vehículo puede permitir la recuperación de la energía de frenado (Bejaoui et al., 2020). Al elegir el motor de accionamiento para el vehículo eléctrico, se deben tener en cuenta una serie de factores para ver el par máximo necesario y estos son la resistencia a la rodadura, la resistencia a la gradiente y la resistencia aerodinámica; la suma de estos factores da como resultado el factor total. (Ganesh Murali et al., 2021). Sin embargo, la difusión de estos sistemas de propulsión alternativos (especialmente eléctricos) se está ralentizando debido a su autonomía, ya que todavía no es comparable a un vehículo tradicional de combustible líquido. De hecho, a pesar del considerable avance en la tecnología de las baterías, la densidad de energía (relación energía / peso) de las baterías de litio aún está lejos de ser competitiva con la gasolina o el diésel (Sandrini et al., 2021). El objetivo final es evitar que el conductor aplique demasiado par a las ruedas motrices y pierda tracción longitudinal (Bohl et al., 2014). Por otro lado, se están siguiendo varios enfoques para montar el tren motriz eléctrico

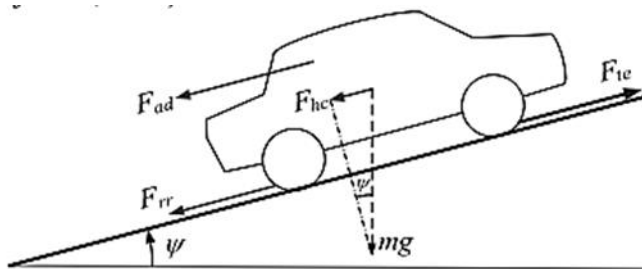
como el tipo péndulo convencional, con o sin base, motores comunes o diferentes y montajes de caja eléctrica, etc. El tren motriz eléctrico se diferencia del tren motriz convencional en términos de pesos, momento de inercia de masa, par, requisitos de NVH como Key in Key off, ralentí, vibraciones de baja frecuencia, etc., (Rane & Deshmukh, 2020).

En este trabajo utiliza el método analítico y bibliográfico con el fin de comprender la dinámica del vehículo eléctrico y poder elegir controlador y motor adecuado. Para ello se ha dividido la investigación enfocándose en los parámetros que influyen en la selección del motor eléctrico y su controlador electrónico que se mencionan continuación: Modelo dinámico del vehículo; Potencia, Torque, Velocidad; Parámetros del vehículo eléctrico; Resultados y selección del motor y controlador. Una vez establecido los grupos se plantea las siguientes interrogantes de investigación. ¿Características de los diferentes modelos dinámicos?, ¿Fórmulas matemáticas?, ¿Cómo aporta al dimensionamientos y parámetros del vehículo?

Modelados del vehículo y sus fuerzas de trabajo

En esta parte se obtiene el modelo de la parte mecánica del VE, la cual se entenderá como el conjunto formado por: la transmisión, las ruedas, y la masa total de sus componentes (baterías, convertidores electrónicos, motor/generador eléctrico, transmisión, carrocería, chasis, etc.). Como entrada a este sistema se considera el par desarrollado por el motor, y como salida la velocidad del VE. (Durán, Guerrero y Claudio, 2009)

Figura 1: Fuerzas actuantes sobre el VE en una pendiente



Por lo tanto, el modelo matemático de la parte mecánica puede servir para dos fines: Evaluar la aceleración y velocidad máximas del VE, a partir del par desarrollado por el motor eléctrico; Conocer el par requerido para que el VE desarrolle un determinado patrón de velocidad. Se utiliza dicho modelo con el fin de determinar las características del motor eléctrico que impulsara

al VE. Para modelar la parte mecánica del VE es necesario determinar la ecuación diferencial relacionada con las fuerzas actuantes en el VE y su velocidad, y también es necesario conocer las ecuaciones que modelan la transmisión del VE (Durán, Guerrero y Claudio, 2009).

La fuerza de fricción F_{rr} entre los neumáticos y la superficie sobre la cual se mueve el vehículo está dada por la ecuación 1.

$$F_{rr} = \mu_r mg \cos(\psi) \text{sign}(v) \quad (1)$$

Donde μ_r es el coeficiente de fricción, m es la masa del vehículo en kg, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ es la aceleración debida a la gravedad, ψ es el ángulo de inclinación de la pendiente, v es la velocidad lineal del VE en m/s y la función $\text{sign}(v)$ está definida por:

$$\text{sign}(v) = \begin{cases} 1 & v > 0 \\ 0 & v = 0 \\ -1 & v < 0 \end{cases}$$

La fuerza de fricción con el viento es, donde $\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$ es la densidad del aire, A es el área frontal del VE en m^2 y C_d es el coeficiente aerodinámico.

$$F_{ad} = \frac{1}{2} \rho A C_d v^2 \quad (2)$$

La fuerza F_{hc} es la componente del peso del VE a lo largo de la pendiente,

$$F_{hc} = mg \sin(\psi) \quad (3)$$

Aplicando la segunda ley de Newton al VE, con el fin de desarrollar el modelo matemático que represente la dinámica del vehículo, se realiza un balance de fuerzas. Sea $Vv(t)$ la velocidad del VE, mv su masa total, $F_t(t)$ la fuerza de tracción generada por el contacto de las llantas con el camino y $F_p(t)$ la fuerza de perturbación debida al arrastre aerodinámico, la fricción de rodamiento y la gravedad. Estas fuerzas se muestran en la figura 1 (Durán, Guerrero y Claudio, 2009).

$$F_{te} - F_{rr} - F_{ad} - F_{hc} = ma \quad (4)$$

Donde a es la aceleración del VE en m/s^2 y F_{te} es la fuerza de tracción proporcionada por el motor eléctrico a través de la transmisión. Despejando F_{te} en (4) y sustituyendo (1), (2) y (3), se obtiene la ecuación diferencial que relaciona la F_{te} con la velocidad.

$$F_{te} = ma + \mu_r mg \cos(\psi) \text{sign}(v) + \frac{1}{2} \rho A C_d v^2 + mg \sin(\psi) \quad (5)$$

Esta ecuación es útil para determinar la fuerza necesaria de tracción para obtener un patrón de velocidad y aceleración deseadas para el VE. (Durán, Guerrero y Claudio, 2009)

De la ecuación 6, es claro que el motor eléctrico del vehículo, juntamente con el sistema de transmisión debe ser capaz de vencer las fuerzas debidas a la gravedad, el viento, la fricción y los efectos inerciales (Amaya, Guerrero, Muñoz, Mino y Saynes, 2012). Aplicando la segunda ley de Newton, se obtiene la ecuación diferencial que relaciona la fuerza de tracción $F_t(t)$ con la velocidad V_v del vehículo:

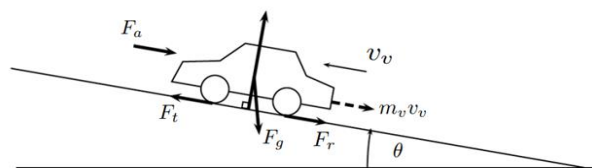
$$m_v \dot{v}_v(t) = F_t(t) - F_p(t) \quad (6)$$

Donde

$$\begin{aligned} F_p(t) &= F_a(t) + F_r(t) + F_g(t) \\ F_a(t) &= \frac{1}{2} \rho_a A_f C_d (v_v(t) + v_{viento}(t))^2 \\ F_r(t) &= \text{sgn}(v_v(t)) m_v g \cos(\theta(t)) C_r \\ F_g(t) &= m_v g \sin(\theta(t)) \end{aligned} \quad (7)$$

C_d es el coeficiente aerodinámico de arrastre, C_r es el coeficiente de fricción de rodamiento, A_f representa el área frontal del vehículo, ρ_a la densidad del aire a 20o C y θ el ángulo de la pendiente. La fuerza F_t es generada por el motor eléctrico, cuyo par generado está en función de la corriente que fluye a través de sus devanados y su velocidad de rotación, como se aprecia en la figura 2.

Figura 2: Diagrama de fuerzas actuando sobre el VE en una pendiente



Los modelos coinciden de la parte dinámica, y cronológicamente antes de poder seleccionar un motor para el tren motriz, se debió calcular el torque necesario para poder impulsar el vehículo, y la potencia requerida para mantener al vehículo a velocidad máxima con carga máxima (Üstün et al., 2018). La fuerza de tracción requerida (F_T) se obtiene mediante la sumatoria de las fuerzas de resistencia del vehículo; la fuerza de resistencia al rodamiento, la fuerza de resistencia aerodinámica o y la fuerza de resistencia a la pendiente, las cuales pueden ser observadas en la Figura 3. (Vázquez, Valenzuela y Ponce, 2015)

$$F_T = F_r + F_w + F_g \quad (8)$$

Fuerza de Resistencia al Rodamiento, donde P es la carga normal actuando en el centro de la rueda, f_r es el coeficiente de resistencia a la rodadura y α es el ángulo del camino en grados.

$$F_r = P * f_r * \cos \alpha \quad (9)$$

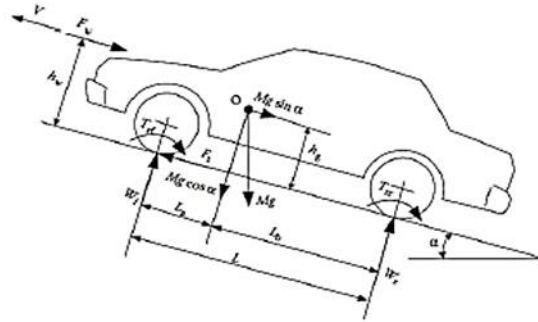
Fuerza de Resistencia Aerodinámica, donde ρ es la densidad del aire, C_d es el coeficiente de arrastre aerodinámico, A_F es el área frontal del automóvil o el área proyectada en el sentido de la dirección en que el vehículo se mueve, V es la velocidad longitudinal del coche y V_W es la velocidad del viento (positiva para el viento en contra y negativa para el viento a favor).

$$F_w = \frac{1}{2} * \rho * C_d * A_F * (V + V_W)^2 \quad (10)$$

La Fuerza de Resistencia a la Pendiente, donde m es la masa del vehículo, g es la constante de aceleración gravitacional y α es el ángulo del camino en grados.

$$F_g = m * g * \sin \alpha \quad (11)$$

Figura 3 Fuerzas que actúan sobre un vehículo al subir una pendiente (Gao y Ehsani et al., 2009)

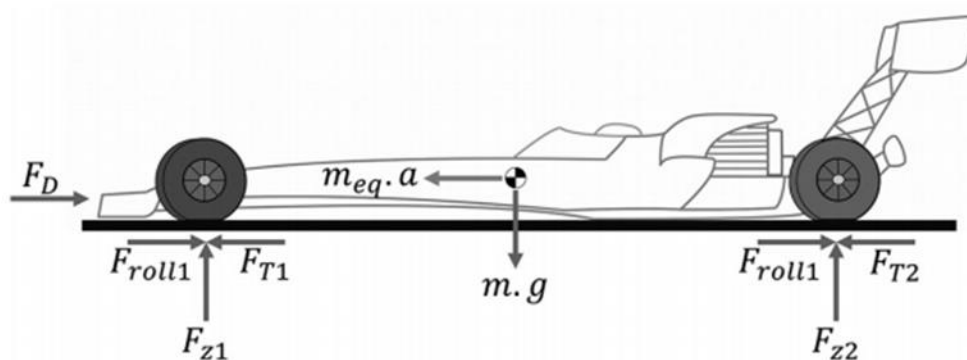


Además, la ecuación de movimiento se obtiene de la siguiente manera:

$$F_T - F_G - F_{roll} - F_D = m_{eq} a \quad (12)$$

Donde F_T es la fuerza de tracción total; F_G es el longitudinal componente de la fuerza gravitacional; F_{roll} es la total fuerza de resistencia a la rodadura; F_D es la fuerza de arrastre aerodinámica; m_{eq} es la masa equivalente; y a es la longitudinal aceleración (Martinez, Cortes, Munoz y Yamamoto, 2016). El objetivo de analizar un modelo dinámico de un vehículo es para poder analizar todas las fuerzas que van a intervenir en el desplazamiento del vehículo haciendo énfasis en determinar la fuerza de tracción de nuestro modelo aplicando cálculos matemáticos.

Figura 4. Diagrama de cuerpo libre del vehículo.

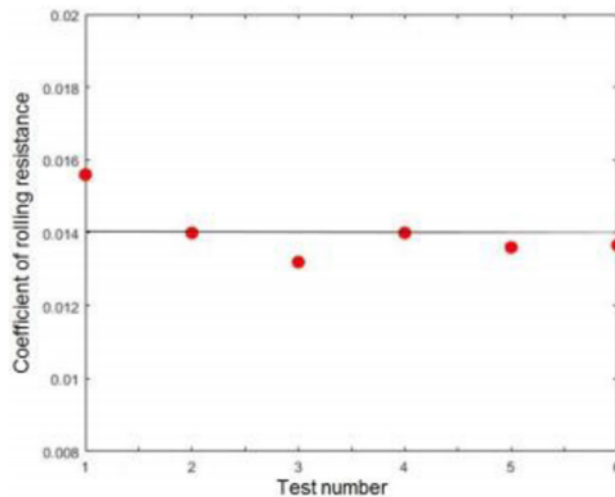


Se muestran el potencial de la vectorización de par con respecto a la estabilidad y la agilidad. También se demuestra que la vectorización de par en dirección lateral influye en el comportamiento dinámico de conducción, mientras que un cambio de par en dirección longitudinal solo lo afecta en condiciones cercanas al límite con valores de deslizamiento

elevados. Además se muestran cómo el comportamiento dinámico del vehículo puede verse influido positivamente mediante la distribución individual del par a las ruedas individuales en diferentes estrategias de control (Angerer et al., 2018)

El coeficiente de resistencia a la rodadura de los neumáticos (f_{rr}) se obtiene a partir de los datos adquiridos durante la prueba de descenso del vehículo en una carretera plana. Durante la prueba, el Prius se acelera a una velocidad de 70 km / h y se le permite desacelerar a una velocidad de 25 km / h mediante las fuerzas de carga de la carretera que consisten en resistencia aerodinámica y resistencia a la rodadura. Las pruebas fueron realizadas en un día tranquilo para eliminar el efecto de la fluctuación de la velocidad del viento. Este procedimiento se repite durante 6 ejecuciones. A medida que se suelta el acelerador durante la marcha por inercia mientras se mantiene el vehículo en neutral, F_{xf} y F_{xr} pueden ignorarse (Buggaveeti et al., 2017).

Figura 5. Gráfico de coeficientes de resistencia a la rodadura (f_{rr}) para 6 carreras diferentes (Buggaveeti et al., 2017)



Variables para seleccionar el motor para nuestro tren motriz

El primer paso de este diseño es la definición de un diseño geométrico de todo el vehículo con el fin de derivar un modelo dinámico de las fuerzas que tienen interacción en el vehículo. Luego, se realiza un procesamiento computacional de este modelo considerando varios requisitos iniciales. Finalmente, se obtiene una aproximación de la potencia, energía y par necesarios a partir de una ejecución de simulación en Matlab (Martínez, Cortes, Muñoz y Yamamoto, 2016).

Torque: Una vez obtenido la fuerza de tracción, ésta se multiplica por el radio dinámico de la rueda para encontrar el torque de tracción, es decir, el torque necesario para impulsar el vehículo.

$$\tau_T = F_T * r_d \quad (13)$$

El torque eléctrico (τ) desarrollado por el motor eléctrico, produce la fuerza de tracción (F_t) del VE, a través de la relación de transmisión (G) establecida, en conjunto al radio del neumático (r), la velocidad angular del neumático (ω), obteniendo la velocidad lineal (v) del vehículo (Alcalá et al., 2014; Rocha et al., 2017), como se presenta en la Figura 3, y expresada en (14).

$$\tau_t = \frac{F_t * r}{G} \quad (14)$$

Potencia: El cálculo de potencia necesaria en el VE se considera la velocidad máxima en pendiente, para prolongar la autonomía, como se presenta en las siguientes ecuaciones (14) y (15):

$$F_{te} = m \cdot a + \mu_{rr} \cdot m \cdot g \cdot \cos(\psi) + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_d \cdot V_a^2 + m \cdot g \cdot \sin(\psi)$$

$$P_{calculada} = F_{te} \cdot V_{max} \quad (15)$$

Se considera, además un 90% de eficiencia del motor de corriente continua (η_m), del tipo de imanes permanentes con escobillas, y garantizar su trabajo en las distintas condiciones de operación, mediante la expresión (16) (Dawei et al., 2014).

$$P_{motor} = \frac{P_{calculada}}{\eta_m} \quad (16)$$

Ya que el torque puede ser modificado fácilmente con una transmisión, se buscó la potencia que requeriría el motor a la velocidad máxima del vehículo. Para obtener la potencia requerida se debe multiplicar la velocidad angular por el torque de tracción obtenido a dicha velocidad angular. Por lo que la potencia requerida se obtiene con la siguiente ecuación 17 (Rane & Deshmukh, 2020).

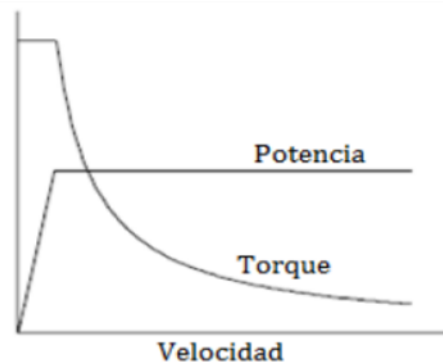
$$P = \tau_T * \omega \quad (17)$$

Para convertir la velocidad lineal a velocidad angular se puede utilizar la ecuación 18:

$$\omega = \frac{v}{r_d} \quad (18)$$

Donde ω es la velocidad angular del neumático dado en rad/seg, V es la velocidad lineal del vehículo en m/s y rd es el radio dinámico del neumático en metros. Existen diferentes tipos de motores eléctricos, cada uno con curvas características diferentes por lo que para obtener el motor óptimo se recomienda que las curvas características se asemejen lo más posibles a la curva ideal para vehículos de tracción, la cual puede ser observada en la Figura 3. (Vázquez, Valenzuela y Ponce, 2015)

Figura 6. Características ideales para la planta de potencia de un vehículo (Gao y Ehsani, 2009)

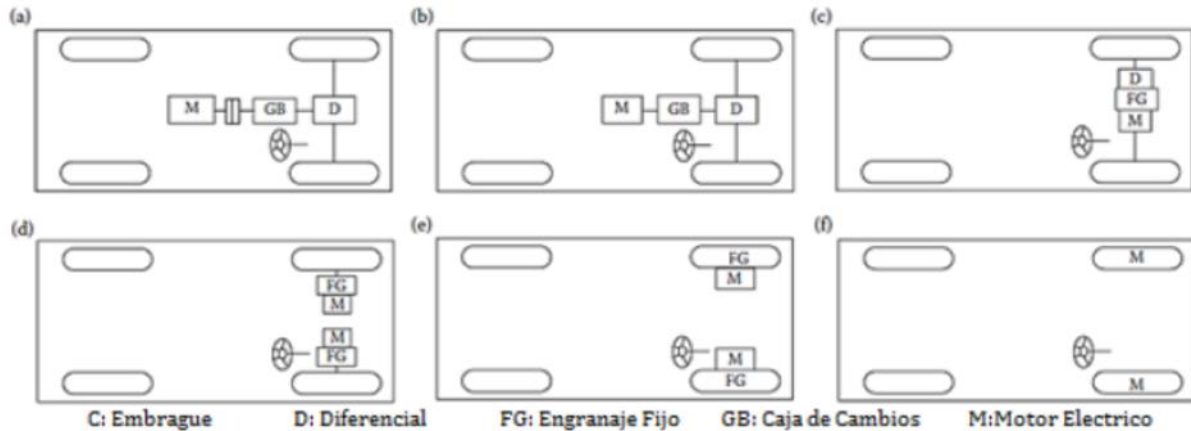


Cuando ya se ha establecido el modelo dinámico del vehículo se encuentra la fuerza de tracción, en base a esta fuerza se procede al cálculo de la potencia, torque, velocidad para poder seleccionar correctamente el motor eléctrico. Existen procesos computacionales a partir del modelo considerando varios requisitos iniciales. Finalmente, se obtiene una aproximación de la potencia, energía y par necesarios a partir de una ejecución de simulación.

Optimización de parámetros del vehículo eléctrico

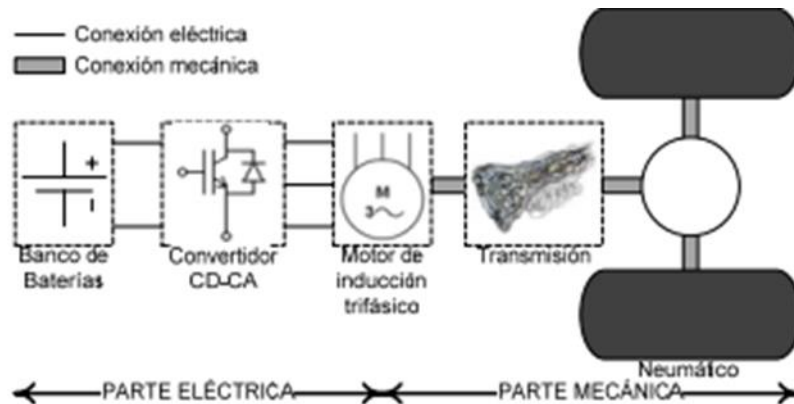
Existe diferentes diagramas dinámicos que se presenta el sistema de tracción y los respectivos parámetros que variaran el diseño del vehículo

Figura 7. Diferentes arquitecturas para VE (Gao y Ehsani, 2009)



De acuerdo con el modelo después haber analizado el diagrama dinámico se presenta el sistema de tracción y los respectivos parámetros determinados de acuerdo con el diseño del vehículo. En la figura 6 se muestra un diagrama de la tracción eléctrica, el cual se puede subdividir en una parte eléctrica/electrónica y en una parte mecánica (Amjadi & Williamson, 2011) El motor de inducción (MI) forma parte tanto de la parte eléctrica como de la mecánica debido a que en este dispositivo se realiza la conversión de energía de eléctrica a mecánica y viceversa (Durán, Aguilera, Guerrero, Claudio, Vela y Gudiño, 2010).

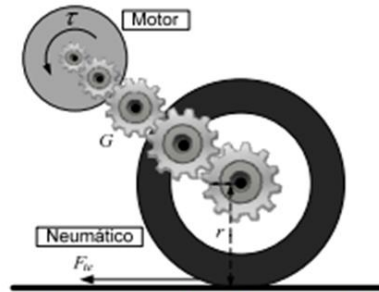
Figura 8. Diagrama del sistema de tracción eléctrica (Durán, Aguilera, Guerrero, Claudio, Vela y Gudiño, 2010)



Transmisión y neumáticos, para el conjunto transmisión–neumáticos se considera como entrada el par electromagnético generado por el motor y como salida la fuerza de tracción en los

neumáticos. Si se considera una transmisión simple, representada en la figura 3, donde r es el radio del

Figura 9. Representación de la transmisión



Los neumáticos en metros, η_g es la eficiencia de la transmisión, G es el cociente de reducción de velocidad angular, τ es el par proporcionado por el motor eléctrico en Newtons·metro y F_{te} es la fuerza de tracción en Newtons. Con las ecuaciones obtenidas a partir del modelo dinámico, se realizaron las simulaciones del funcionamiento del VE en lazo abierto utilizando simulink®, donde se ha logrado establecer los parámetros del vehículo eléctrico que se presentan a continuación en la tabla 1:

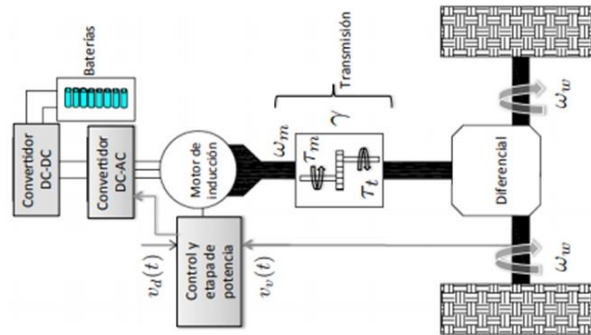
Tabla 1 Parámetros del VE

Parámetro	Valor
Resistencia de estator, R_s	0.06336 Ω
Resistencia de rotor, R_r	0.073558 Ω
Inductancia de dispersión de estator, L_{ls}	0.8646 mH
Inductancia de dispersión de rotor, L_{lr}	0.8646 mH
Inductancia de magnetización de estator, L_{ms}	17.913 mH
Inductancia de magnetización de rotor, L_{mr}	17.913 mH
Inductancia mutua estator-rotor, L_{sr}	17.913 mH
Momento de inercia, J_M	1.0473 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$
Coefficiente de fricción viscosa, B	11.5x10 ⁻³ N·m·s
Número de pares de polos, n_p	2
Masa, m	1366 kg
Coefficiente aerodinámico, C_d	0.23
Área frontal, A	2.66 m^2
Coefficiente de fricción, μ_{rr}	0.015
Cociente de la transmisión, G	5.5
Eficiencia de la transmisión, η_g	0.95
Radio de los neumáticos, r	0.2876 m

Por otro lado de acuerdo con el siguiente modelo después haber analizado el diagrama dinámico se presenta el sistema de tracción y los respectivos parámetros determinados de acuerdo con el

diseño del vehículo. La figura 8 muestra cada uno de los componentes y subsistemas que conforman el VE y de los cuales el modelo matemático fue obtenido con el objetivo de implementar el simulador computacional. En los siguientes apartados se da una descripción de los elementos y se presenta el modelo matemático de cada uno de ellos (Trinidad, Guerrero, Hernández, Mino y Saynes, 2012).

Figura 10. Subsistemas que componen el vehículo eléctrico



Con el fin de verificar el funcionamiento correcto del simulador desarrollado en este trabajo, el cual fue realizado en MATLAB/Simulink, se presenta a continuación una simulación. Los parámetros utilizados en la simulación se muestran en las Tablas 2 donde se especifica las características de entrada desde la parte eléctrica del sistema del vehículo eléctrico y la tabla 3 describe los valores mecánicos de trabajo para el VE (Trinidad, Guerrero, Hernández, Mino y Saynes, 2012).

Tabla 2 Parámetros del MI

Parámetros motor	Valor
Velocidad nominal, ω_{rated}	1415 rpm
Coefficiente aerodinámico C_d	0.2
Potencia nominal, P_{rated}	1.1 kW
Par nominal, τ_m	7.4 Nm
Tensión Nominal, V_{rated}	230/400 V
Corriente nominal, I_{rated}	4.43A
Frecuencia nominal, f_{rated}	50 Hz
Factor de potencia, $\cos(\varphi)$	0.81
Corriente en vacío, I_0	2.13A
Momento de Inercia, J_M	0.0024 kg.m ²
Resistencia del devanado del estator, r_s	9.21 Ω
Resistencia del devanado del rotor, r_r	6.644 Ω
Inductancia de pérdidas del estator, l_{ls}	32.07 mH
Inductancia de pérdidas del rotor, l_{lr}	444.15mH
Inductancia magnetizante de las tres fases, l_m	444.15mH
Peso, M	13kg

Tabla 3 Parámetros del VE y sistema de tracción

Parámetro	Valor
Masa de vehículo , m_v	200 Kg
Coefficiente aerodinámico C_d	0.2
Área Frontal, A_f	1.5 m ²
Coefficiente de fricción, C_r	0.015
Eficiencia de transmisión, η_{TS}	0.97
Radio de neumáticos, r_w	0.2 m
Cociente de la transmisión, γ	6

Además, en cuanto a la arquitectura seleccionada para el diseño, se observa que requiere de dos motores, y con ello el doble de corriente para impulsar el vehículo, lo que se traduce en la necesidad de una batería con una alta capacidad (Vázquez, Valenzuela, y Ponce, 2015). Mediante un análisis en Matlab se determinó los siguientes parámetros.

Tabla 4 Valores asignados a cada variable (Vázquez, Valenzuela, y Ponce, 2015).

Variables	
Peso Neto	1300 kg
Carga Máxima	500 kg
Capacidad de subida máxima	20 %
Velocidad máxima	80 km/h
Autonomía	150 km
Radio dinámica del neumático	616.6 mm
Coef. De resistencia a la rodadura	0.0062
Coef. De arrastre aerodinámico	0.28
Área frontal	2.30 m ²

Tabla 5 Características del reductor diseñado

Características Reductor	
Relacion Final	10.08:1
Primera Etapa	
Modulo	3
Dientes Piñon	15
Dientes Engrane	43
Relación	2.8:1
Diámetro Engrane	126 mm
Diámetro Piñon	45 mm
Distancia entre Ejes	85.5 mm
Segunda Etapa	
Modulo	
Dientes Piñon	15
Dientes Engrane	54
Relación	3.6:1
Diámetro Engrane	162 mm
Diámetro Piñon	45 mm
Distancia entre Ejes	103.5 mm

Tabla 6 Características del tren motriz diseñado

Características	Diseño
Tipo de Motor	2 Motores de Inducción
Potencia Max.	55 km/h
Torque Max.	235 Nm
Velocidad Max.	80 km/h
Relacion Final	10.8:1
Tipo de Bateria	Ion Litio
No. De Celdas	8,151
Capacidad	188.5 kWh
Voltaje	120 V
Autonomía	179.5 km
Peso Neto Vehiculo	1,300 kg
Peso Motor	45.4.kg
Peso Baterias	916.3 kg
Llantas	P185/70 R14

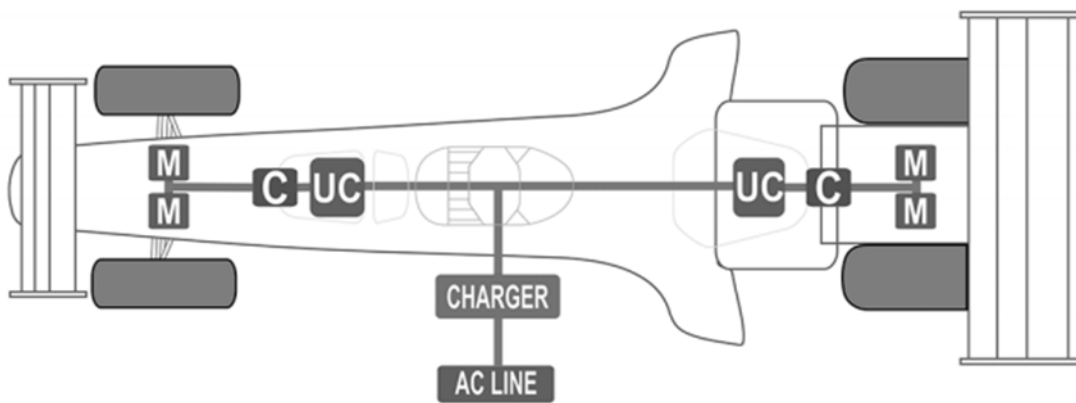
En suma, a este análisis, los parámetros mecánicos se definieron en base a un diseño geométrico obtenido después de varias iteraciones de diseño considerando los puntos de vista mecánico y eléctrico. También se tuvieron en cuenta los parámetros de los motores preseleccionados. En el primer escenario, el modelo de dinámica longitudinal, y se estima el consumo de energía mecánica. Los parámetros mecánicos del escenario propuesto se presentan en la Tabla 7. En este caso, se supone que los neumáticos tendrían un coeficiente de tracción lo suficientemente alto como para transferir las fuerzas a la carretera con un deslizamiento longitudinal promedio de menos del 5% y una total eficiencia de transmisión de $\eta_{tf} = 0,9$. Finalmente, este vehículo está diseñado para funcionar en las afueras de Bogotá, Colombia, donde la densidad del aire es aproximadamente $\rho = 0,9 \text{ kg} / \text{m}^3$, (Martinez, Cortes, Munoz, y Yamamoto, 2016).

Tabla 7 Parámetros mecánicos

Parameter	Value
Initial equivalent mass [kg]	750
Number of motors	4
Peak power per motor [kW]	50
Peak torque per motor [Nm]	440
Maximum rotating speed of motors [RPM]	6500
Drag coefficient	0,35
Area [m ²]	2,5
Tire radius [cm]	30
Rolling coefficient [-]	0,015
Transmission efficiency [%]	90
Air Density [kg/m ³]	0,9
Total reduction ratio	3,51:1

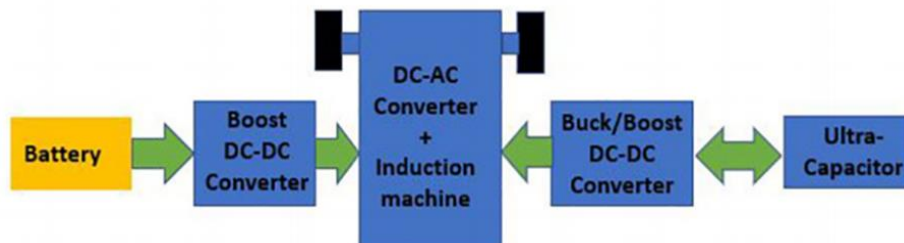
En este contexto, la configuración del tren motriz seleccionada para esta aplicación está compuesta por un sistema de almacenamiento dividido en dos partes. Cada parte tiene tres ultra condensadores conectados en serie que alimentan un convertidor CC-CC de 100 kW. Cada convertidor DC-DC establece la interfaz entre los tres ultra condensadores y los inversores de los dos motores BLPM en la Figura 9. Ambas partes del sistema tienen un Sistema de Gestión de Energía (EMS) capaz de controlar el flujo de energía para equilibrar ambas partes del tren motriz a 100 kW (Martinez, Cortes, Munoz, y Yamamoto, 2016).

Figura 11. Diagrama de distribución del vehículo eléctrico (M=motor, C=DC-DC conversor, UC= Ultra capacitor)



Desde otra perspectiva, para transferir la energía de una fuente de voltaje CC a una carga a través de un mecanismo de conmutación basado principalmente en un transistor de efecto de campo semiconductor de óxido metálico (MOSFET), se necesitan convertidores CC-CC. Cabe señalar que la gestión y el intercambio de energía entre las diferentes partes del sistema en particular entre la fuente principal (batería o pila de combustible) y el paquete supercapacitor a través de los dos convertidores DC-DC. Además, en este sistema la batería se utiliza para emular la pila de combustible (Bejaoui et al., 2020)

Figura 12. Diagrama de trabajo actual de VE

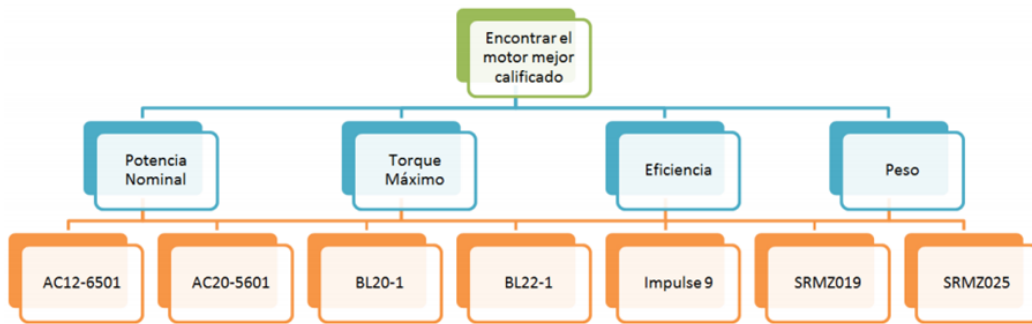


Casos de selección del motor y controlador

La metodología del proceso de análisis jerárquico se utilizó para la selección del motor más adecuado en base a las especificaciones de diseño, teniendo que, para este análisis, se empleó el software “Super Decisions”, versión gratuita provista por internet (Vázquez, Valenzuela, y Ponce, 2015).

En la Figura 11 se muestra el diagrama jerárquico empleado en la etapa final de la selección de motores, los valores asignados a la comparación entre criterios y a la comparación entre motores según cada criterio se desarrolla de acuerdo la necesidad (Vázquez, Valenzuela, y Ponce, 2015).

Figura 13. Diagrama jerárquico utilizada para la selección del motor



En la Figura 12 se pueden ver los resultados del proceso de análisis jerárquico. En base a dichos resultados se eligió el motor de inducción Curtis AC 12 6501 sobre los motores Brushless, esto debido a que no se contaba con las curvas características de los motores Brushless, al contrario del motor de inducción del cual se tenía información más detallada. Otra ventaja era que el motor de inducción seleccionado ya incluía el controlador 1238-6501 marca Curtis, el cual funciona por modulación de pulso del tipo IFO (Indirect Field Orientation) (Vázquez, Valenzuela y Ponce, 2015)

Figura 14 Resultados del proceso de análisis jerárquico para la selección del motor

Name	Graphic	Ideals	Normals
AC12-6501		0.414427	0.140462
AC20-5601		0.367725	0.124634
BL20-1		0.473280	0.160409
BL22-1		1.000000	0.338932
Impulse9		0.137523	0.046611
SRMZ019		0.270590	0.091712
SRMZ025		0.286902	0.097240

Por otro lado en base a los resultados de simulación obtenidos en la sección, es posible realizar la selección del motor eléctrico que impulsara al VE, cuyos parámetros son capaces de desarrollar los ciclos de conducción SAE J227a-C, SAE J227a-D, FUDS, SFUDS y ECE-15 es necesario contar con un motor eléctrico que reúna las siguientes características: Una velocidad máxima superior a 484.73 rad/s (ciclo FUDS), El par para desarrollar una velocidad crucero de 20m/s (ciclo SAE J227a-D) es de 19.47 N·m, por tanto el par nominal del motor debe superar este valor, Un par máximo superior a 132.37 N·m (ciclo FUDS), La potencia a velocidad crucero de 20 m/s (ciclo SAE J227a-D) es de 7.45 kW, que es el valor mínimo de la potencia nominal del motor, Una potencia máxima de al menos 35.05 kW (ciclo SAE J227a-D) (Durán et al., 2009).

Existen diferentes tipos de motores eléctricos, por ejemplo, de corriente directa con escobillas, de corriente directa sin escobillas, de inducción, síncrono y de reluctancia variable por mencionar algunos. Para nuestro caso se empleó un motor de inducción trifásico tipo jaula de ardilla, debido a su bajo costo, buen desempeño, gran disponibilidad en el mercado y necesidad de poco mantenimiento (Durán et al., 2009) (Szántó & Szíki, 2020)

Conclusiones y recomendaciones

Se debe haber identificado las propiedades principales del vehículo para la optimización integral del diseño de los trenes de potencia de los vehículos eléctricos como dinámica longitudinal, dinámica lateral, rendimiento todoterreno, eficiencia económica, Sostenibilidad ecológica y la ubicación de la batería que podría tener un impacto en el desarrollo de nuestros vehículos.

Se han discutido varios tipos de montaje del tren motriz eléctrico, dependiendo del esquema de montaje del tren motriz, se pueden usar diferentes estrategias de trabajo para su funcionamiento donde se muestre la posibilidad para el caso de la transformación de un

vehículo con montaje de tren motriz convencional y su conversión a tren motriz eléctrico.

A partir del modelo dinámico de las fuerzas que tienen interacción en el vehículo, se desarrolla la aproximación de la energía, potencia, par y velocidad necesarios de nuestro vehículo eléctrico que dependerá de los sistemas y las pérdidas que aparezcan en el modelo propuesto para conseguir un diseño lo mas eficiente posible para una movilidad sustentable.

Referencias

1. Amjadi, Z., & Williamson, S. S. (2011). Modeling, simulation, and control of an advanced Luo converter for plug-in hybrid electric vehicle energy-storage system. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 60(1), 64–75. <https://doi.org/10.1109/TVT.2010.2088146>
2. Angerer, C., Krapf, S., Buß, A., & Lienkamp, M. (2018). Holistic modeling and optimization of electric vehicle powertrains considering longitudinal performance, vehicle dynamics, costs and energy consumption. *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*, 3. <https://doi.org/10.1115/DETC2018-85430>
3. Bayar, K. (2020). Performance comparison of electric-vehicle drivetrain architectures from a vehicle dynamics perspective. In *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* (Vol. 234, Issue 4, pp. 915–935). <https://doi.org/10.1177/0954407019867491>
4. Bejaoui, F., Mechmeche, C., Tlili, A. S., & Yahoui, H. (2020). Design and implementation of a hybrid control for the energy management system in electric traction. In *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part I: Journal of Systems and Control Engineering* (Vol. 234, Issue 10, pp. 1075–1087). <https://doi.org/10.1177/0959651820932677>
5. Bohl, D., Kariotoglou, N., Hempel, A. B., Goulart, P. J., & Lygeros, J. (2014). Model-based current limiting for traction control of an electric four-wheel drive race car. *2014 European Control Conference, ECC 2014*, 1981–1986. <https://doi.org/10.1109/ECC.2014.6862532>
6. Buggaveeti, S., Batra, M., McPhee, J., & Azad, N. (2017). Longitudinal Vehicle Dynamics Modeling and Parameter Estimation for Plug-in Hybrid Electric Vehicle. *SAE International Journal of Vehicle Dynamics, Stability, and NVH*, 1(2), 289–297. <https://doi.org/10.4271/2017-01-1574>
7. Dawei, M., Yu, Z., Meilan, Z., & Xiaochen, T. (2014). Research on Energy Flow Optimization of Compound Storage System in Pure Electric Vehicle with Longitudinal Dynamics. *International Journal of Control and Automation*, 7(12), 261–268. <https://doi.org/10.14257/ijca.2014.7.12.24>

8. Gómez Vilchez, J. J., & Jochem, P. (2019). Simulating vehicle fleet composition: A review of system dynamics models. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 115). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109367>
9. Holjevac, N., Cheli, F., & Gobbi, M. (2020). Multi-objective vehicle optimization: Comparison of combustion engine, hybrid and electric powertrains. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 234(2–3), 469–487. <https://doi.org/10.1177/0954407019860364>
10. Hu, J., Morais, H., Sousa, T., & Lind, M. (2016). Electric vehicle fleet management in smart grids: A review of services, optimization and control aspects. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 56, pp. 1207–1226). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.014>
11. Rane, G., & Deshmukh, S. (2020). Development of Mount for Electric Powertrains-A Multi Degree of Freedom Optimization Approach. *SAE Technical Papers*, 2020-April(April). <https://doi.org/10.4271/2020-01-0417>
12. Sandrini, G., Gadola, M., & Chindamo, D. (2021). Longitudinal dynamics simulation tool for hybrid apu and full electric vehicle. *Energies*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/en14041207>
13. Szántó, A., & Szíki, G. Á. (2020). Review of Modern Vehicle Powertrains and Their Modelling and Simulation in MATLAB/Simulink. *International Journal of Engineering and Management Sciences*, 5(2), 232–250. <https://doi.org/10.21791/ijems.2020.2.29>.
14. Üstün, Ö., Tuncay, R. N., Mökükcu, M. S., Kivanç, Ö. C., Tosun, G., Gökçe, C., & Çakan, M. (2018). An integrated approach for the development of an electric vehicle powertrain: Design, analysis, and implementation. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 26(3), 1541–1554. <https://doi.org/10.3906/elk-1701-136>
15. Duran, M., Ramírez, G., Y Claudio, A. (2009). Determinación de los requerimientos de par, velocidad angular y potencia para el motor de un vehículo eléctrico. 2-6. Recuperado de: http://amca.mx/memorias/amca2009/articulos/amca2009_54.pdf

16. Durán, M., Gudiño, J., Charre, S., y Alcalá, J. (2014). Modelado y Diseño del Controlador para un Sistema de Tracción de un Vehículo Eléctrico. *Inf. tecnol*, 25(6), 3. doi: 10.4067/S0718-07642014000600013
17. Amaya-Trinidad, P., Guerrero-Castellanos, J. F., Muñoz-Hernández, G. A., Mino-Aguilar, G., & Saynes-Torres, J. (2012). Modelado, control y simulación de un vehículo eléctrico. In *Memorias del Congreso Nacional de Control Automático (October 2012)*, Cd. del Carmen, Campeche, México.
18. Vázquez, E., Valenzuela, R., y Ponce, C. (2015). Diseño de un tren de potencia de vehículo eléctrico para su aplicación a un taxi. *CULCyT*, 57(1), 311-316. Recuperado de: <http://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/article/view/789/755>
19. Martínez, W., Cortes, C., Muñoz, L., y Yamamoto, M. (2016). Diseño de un tren de potencia eléctrico de 200 kW para un vehículo eléctrico de alto desempeño. *Ing. Investig*, 36(3), 67-70. doi: 10.15446/ing.investig.v36n3.53792
20. Gao, Y., & Ehsani, M. (2009). Design and control methodology of plug-in hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(2), 633-640.
21. Rocha-Hoyos, J., Tipanluisa, L. E., Reina, S. W., & Ayabaca, C. R. (2017). Evaluación del Sistema de Tracción en un Vehículo Eléctrico Biplaza de Estructura Tubular. *Información tecnológica*, 28(2), 29-36.
22. Alcalá, I. y otros cuatro autores, Electric Vehicle Emulation Based on Inertial Flywheel and a Dc Machine, doi:dx.doi.org/10.15446/dyna.v81n183.31638, *Dyna rev. fac. nac. minas*, 81 (183), 86 - 96 (2014)
23. Trinidad, P., Guerrero, F., Hernández, G., Mino, G., y Saynes, J. (2012). Modelado, control y simulación de un vehículo eléctrico. D.R. © AMCA. 131-132. Recuperado de: https://www.researchgate.net/profile/Purificacion_Amaya_Trinidad2/publication/281870104_Model_simulation_and_control_of_an_electric_vehicle/links/55fc7cbb08aec948c4b6658b/Model-simulation-and-control-of-an-electric-vehicle.pdf