

Análisis de vehículos híbridos e híbridos paralelos para la movilidad urbana

Analysis of full hybrid and parallel hybrid vehicles for urban mobility

Pablo Enrique Cortés Muñoz¹ y César Alexander Chacón Cardona ²

Fecha de Recepción: 26 de julio de 2021

Fecha de Aceptación: 16 de octubre de 2024

Cómo citar: Cortés Muñoz P. E., Chacón Cardona C.A. (2024). Análisis de vehículos híbridos e híbridos paralelos para la movilidad urbana. *Tecnura*, 28(80), 148-165. <https://doi.org/10.14483/22487638.18316>

Resumen

Objetivo: Analizar eléctrica y económicamente dos tipos de vehículos híbridos: híbridos (*full hybrid*) e híbridos paralelos (*parallel hybrid*). Esto les permitirá a los lectores de campos relacionados con la ingeniería conocer las fortalezas y opciones de mejora que existen en este campo.

Metodología: Se realizó un rastreo bibliográfico, análisis y comparación de diferentes investigaciones. Se resumieron las principales estrategias de control y las características eléctricas y económicas de los vehículos híbridos, las cuales representan nichos de investigación para las ingenierías Eléctrica, Electromecánica, entre otras.

Resultados: Los motores, convertidores de tensión, baterías, sistemas de frenado y suspensión son nichos importantes de investigación para el desarrollo de vehículos híbridos. Adicionalmente, áreas como el control y la optimización son de gran importancia, pues de estas depende la correcta sincronía entre los sistemas de propulsión y el uso óptimo de la energía del vehículo. El precio de compra de un vehículo híbrido es más elevado que el de un vehículo tradicional. Sin embargo, esto se compensa con un mayor beneficio social y un mejor rendimiento operativo, pues el consumo de hidrocarburos se reduce en un 50 % aproximadamente, con respecto a los vehículos tradicionales.

Conclusiones: A pesar de las ventajas económicas y sociales de los vehículos híbridos, aún se presentan opciones de mejora en cuanto a los materiales de construcción de motores y baterías; en el aprovechamiento de las fuerzas dinámicas y estáticas presentes en los vehículos; y en el desarrollo de estrategias de control y optimización para el uso eficiente de la energía.

Palabras clave: vehículos, híbridos, motor, eléctrico, térmico, eficiencia, par, costos, ingeniería, piezoeléctricos.

¹Estudiante de Ingeniería Eléctrica por ciclos propedéuticos, Universidad Distrital Francisco José de Caldas . Bogotá, Colombia. Email: pecortesm@correo.udistrital.edu.co

²Doctorado en Física, físico. Docente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas . Bogotá, Colombia. Email: cachaconc@udistrital.edu.co

Abstract

Objective: To electrically and economically analyze two types of hybrid vehicles: Parallel Hybrid and Full Hybrid. This analysis is easily related to the readers of engineering fields to know the results are the strengths and options for improvement that exist regarding this type of vehicle.

Methodology: A bibliographic search, analysis and comparison of different investigations was carried out, summarizing the main control strategies and the electrical and economic characteristics of hybrid vehicles, which represent research niches for electrical, electromechanical and related engineering.

Results: Motors, voltage converters, batteries, braking and suspension systems are important research niches for the development of hybrid vehicles. Additionally, areas such as control and optimization are of great importance since the correct synchronization between the propulsion systems and the optimal use of the vehicle's energy depend on these. The purchase price of a hybrid vehicle is higher than that of a traditional vehicle. However, this is offset by a greater social benefit and better operating performance, since the consumption of hydrocarbons is reduced by approximately 50 % compared to traditional vehicles.

Conclusions: Despite the economic and social advantages of hybrid vehicles, there are still options for improvement in terms of construction materials; motors and batteries, and in the use of dynamic and static forces present in vehicles. Additional development of control and optimization strategies for efficient energy use.

Keywords: Vehicles, Hybrids, Motor, Electric, Thermal, Efficiency, Torque, Costs, Engineering, Piezoelectric.

Introducción

La dependencia del petróleo afecta social, ambiental y económicamente a las sociedades modernas. Los medios de transporte son, hoy, en su mayoría dependientes del petróleo, por eso es fundamental estudiar nuevas formas de transporte que sean más eficientes ecológica y económicamente, que además logren reducir la dependencia del petróleo y los daños que esta causa. El sector automotor afecta en gran medida la calidad del aire, pues su principal fuente de combustible continúa siendo los derivados del petróleo. En esta coyuntura, los avances tecnológicos han permitido el desarrollo de motorización eléctrica, tanto así que actualmente casi se ha duplicado la venta de vehículos eléctricos (VE) y de vehículos híbridos eléctricos (VHE) en Colombia, pasando de tener 3135 unidades vendidas en 2019, a 6004 unidades vendidas en 2020. En esta demanda sobresalen los vehículos híbridos con un total de 4697 unidades vendidas contra 1307 unidades de vehículos eléctricos vendidos en Colombia para 2020 ([Asociación Nacional de Empresarios de Colombia \[ANDI\], 2021](#)).

Dado este auge, en el desarrollo de este artículo se busca analizar el funcionamiento de dos tipos de vehículos híbridos: híbridos paralelos (*parallel hybrid*) e híbridos (*full hybrid*). Este análisis dará a conocer al sector de la ingeniería una nueva tecnología que viene tomando cada vez más impulso en el mundo. Les permitirá a los lectores de campos relacionados con las ingenierías, como la eléctrica y la electromecánica, conocer las fortalezas y opciones de mejora que existen en este tipo de vehículos. Al mismo tiempo, se busca tener un mayor entendimiento a

cerca de los vehículos híbridos. El propósito es que este conocimiento pueda ser apropiado y desarrollando en las universidades del país. Esto permitiría un avance tecnológico y social en conjunto con el sector industrial, el cual constituiría el primer paso para el progreso y crecimiento de una sociedad moderna.

Antecedentes

Los vehículos tradicionales utilizan motores térmicos, los cuales están definidos por el ciclo térmico de Carnot. En el caso de un motor de combustión interna, solo el 20 % de la energía producida por este se utiliza para hacer funcionar el vehículo y el 80 % restante se disipa a través de calor no recuperable para desarrollar trabajo ([Kumar y Thakura, 2019](#)).

En los VE, se tienen grandes ventajas como: cero emisiones de gases contaminantes, mejor relación par/velocidad y un menor costo de mantenimiento, al tener sistemas de transmisión más sencillos en comparación con un vehículo tradicional. Sin embargo, los vehículos eléctricos tienen algunas desventajas en cuanto a la portabilidad y provisión de energía eléctrica; la poca cantidad de electrolineras (estaciones públicas de carga), masa y tamaño de las baterías, además del tiempo prolongado de carga. A esto se suma que los VE son más costosos para su adquisición que los tradicionales ([Coffman et al., 2017](#)). Por estas desventajas, se han desarrollado propuestas híbridas que combinan el impulso motor generado por un motor eléctrico con el de uno térmico ([Chele Sancan 2017](#)); al existir un complemento entre el sistema térmico y eléctrico para la propulsión del vehículo, se reducen las emisiones de gases contaminantes, así se conserva la potencia y autonomía de los vehículos convencionales ([Sánchez 2009](#)).

Los VHE cuenta con un sistema de frenado regenerativo el cual transforma la energía cinética generada durante el frenado en energía eléctrica, la cual se usa posteriormente para recargar las baterías y, con ello, aumentar la autonomía del vehículo ([Duran Tovar et al., 2020](#); [Kebriai et al., 2015](#)).

Actualmente sobresalen tres tipos de VEH nombrados según la configuración de su tren motor: híbrido serie, híbrido paralelo e híbrido. En la configuración en serie, un banco de baterías y un generador ensamblado al motor térmico suministran energía a un motor eléctrico, el cual se encarga de generar el impulso motor suficiente para el movimiento del vehículo ([Shen et al., 2011](#)). En contraste, la configuración en paralelo ofrece la posibilidad de que el impulso motor dependa del motor térmico, del motor eléctrico o de una combinación de los dos sistemas de propulsión ([Chen et al., 2019](#)). La configuración híbrida (*full hybrid*) combina los dos sistemas anteriores ofreciendo más variables y combinaciones para el accionamiento del vehículo ([Orecchini et al., 2018](#)).

Independiente de la configuración del vehículo se debe tener en cuenta el grado de hibridación, es decir el equilibrio correcto entre los sistemas de propulsión eléctrica y térmica (Buecherl *et al.*, 2009; Holder y Gover 2006).

Estudio eléctrico VEH

En la tabla 1 se muestran las especificaciones técnicas de dos vehículos: Toyota Corolla (híbrido) y KIA Niro (híbrido paralelo).

Tabla 1. Especificaciones técnicas vehículos Toyota Corolla y KIA Niro

Especificaciones técnicas	Toyota Corolla HV 2020	KIA Niro híbrido 2020
Potencia máxima motor térmico (gasolina)	71 kW	72,2 kW
Potencia máxima motor eléctrico	53 kW	32 kW
Potencia máxima (combinada-híbrida)	90 kW	103,6 kW
Par máxima motor térmico (gasolina)	142 Nm	147 Nm
Par máxima motor eléctrico	163 Nm	170 Nm
Par máximo (combinado)	170 Nm	265 Nm
Tipo de baterías	Níquel-hidruro metálico (Ni-MH)	Polímero de iones de litio
Tensión baterías	201,6 V	240 V
Capacidad baterías	6,5 Ah	6,5 Ah
Consumo de combustible	3,4 l/100 km	3,8 l/100 km

Nota: elaborada a partir de [Toyota.mx](https://toyota.mx) (2020) y [Press.kia.com](https://press.kia.com) (2020).

Potencia máxima en el motor térmico

En este tipo de motores se realiza una combustión interna de un hidrocarburo (gasolina); en este proceso térmico se generan gases a alta presión y temperatura, los cuales producen el movimiento del motor. En términos de potencia térmica, no existe una gran diferencia entre los dos vehículos, pues el sistema Hybrid Synergy Drive (THS II) de Toyota utiliza un motor de ciclo Atkinson (Vecchio *et al.*, 2005; Toyota.es, 2017), al igual que el sistema KIA con su motor

Kappa 1,6 L GDI (Hwang *et al.*, 2016; Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, 2020), los cuales son muy populares en los VEH debido a su eficiencia mejorada (Asghar *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2021).

Potencia máxima en el motor eléctrico

La máxima eficiencia de un motor eléctrico suele estar cerca del 75 % de su carga nominal (Program of the U.S. Department of Energy, 2014), es decir que de los 53 kW nominales del motor eléctrico del vehículo Toyota Corolla el 39,75 kW son usados para el movimiento del vehículo, mientras que en el KIA Niro 24 kW. En la actualidad se investiga sobre el uso de motores de eficiencia superior, los cuales reducen en gran medida las pérdidas calóricas y de fricción que se producen en el proceso electromotor (Costa, 2010); el uso de motores PM (síncrono de imán permanente) sin escobillas a gran velocidad, que cuentan con menor tamaño y con un par máximo superior al de cualquier otro motor eléctrico (Jones, 2014), y el uso de motores de flujo magnético transversal, que permiten un mayor número de polos que bobinados en el rotor, lo cual se traduce en un par más elevado (Labriola, 2020), entre otros.

Par máximo

En cuanto al par máximo de un motor eléctrico este es mayor al de un motor térmico aun cuando el motor eléctrico sea de menor potencia, tal como se evidencia en las especificaciones técnicas de ambos vehículos. Esto es debido a que los motores térmicos tienen características de par/velocidad lejos del rendimiento ideal, pues a una alta velocidad la salida de potencia del motor aumenta, pero el par disminuye. En contraste, en un motor eléctrico el par motor permanece constante desde el arranque hasta una velocidad media, mientras que la potencia aumenta. Una vez superada la velocidad media en un motor eléctrico, el par disminuye hiperbólicamente y la potencia permanece constante (Ehsani, 2005).

Baterías

En los vehículos híbridos existen baterías de arranque y tracción: las primeras son las típicamente usadas en los vehículos tradicionales y tienen como función básica el encendido del vehículo; mientras que las de tracción son las encargadas de suministrar energía al sistema de propulsión eléctrica. En la actualidad se destacan tres tipos de baterías según sus materiales de construcción; baterías de polímero de iones de litio (Li-ion), baterías de plomo-ácido y finalmente las baterías de níquel-hidruro metálico (Ni-MH), las cuales son muy comunes en los VHE debido a las ventajas de tamaño, masa y capacidad energética que estas ofrecen (Lewis *et al.*, 2012). Las baterías de polímero de iones de litio (Li-ion) tienen mayor energía específica, densidad de energía y potencia que las de hidruro metálico (Ni-MH) y plomo ácido, además de una tasa de autodescarga más baja. Estas características posicionan a las baterías de polímero

de iones de litio (Li-ion), entre las mejores alternativas para el almacenamiento de energía en los VEH (Xia, *et al.*, 2015; Karden *et al.*, 2007).

Electrónica de potencia

Los convertidores, rectificadores, inversores y demás elementos de control y conmutación son cruciales para el funcionamiento de los vehículos híbridos. El sistema Toyota Hybrid Synergy Drive II está compuesto por un convertidor DC-DC para la batería auxiliar, un convertidor DC-DC para la batería de tracción e inversores para: aire acondicionado, motor de arranque, generador, motor de tracción (Emadi *et al.*, 2008). En el caso del KIA Niro, la unidad de control de energía híbrida (HPCU) cuenta con dos inversores, convertidores DC-DC, conexiones de alta tensión para las baterías de tracción y el sistema de propulsión eléctrico (Knirnet, 2017). El empaquetado de todas estas unidades en un solo sistema se conoce como PEBB (*power electronic building block*), el cual mejora la eficiencia y desempeño de los dispositivos tradicionales con técnicas que usan bloques de construcción los cuales son consistentes entre sí (Andes, 2013).

Consumo de combustible

El máximo desempeño de los VEH se logra mediante estrategias de gestión de la energía (EGE), clasificadas en cuatro tipos: métodos basados en reglas (Marzougui *et al.*, 2019), control inteligente para la distribución de energía (Navale y Havens, 2014; Schouten *et al.*, 2002), métodos de optimización con algoritmo genético (Montazeri-Gh *et al.*, 2006) y programación dinámica (Pérez *et al.*, 2006; Cipek *et al.*, 2020).

En las tablas 2 y 3, se compara el consumo en litros por cada 100 km para los vehículos híbridos (*full hybrid*) e híbridos en paralelo.

Tabla 2. Comparación de consumo de combustible para los ciclos UDDS y HWFET

Consumo de combustible (l/100 km)	Control basado en reglas	Control SDP (stochastic dynamic programming)	Control ECMS (equivalent consumption minimization strategy)	Control DP (dynamic programming)
UDDS	4,12	3,61	3,67	3,51
HWFET	4,35	4,12	4,20	4,12

Nota: elaborada a partir de Liu y Peng (2008).

Tabla 3. Comparación de consumo de combustible para los ciclos UDDS y HWFET, según diversos algoritmos de control para vehículos híbridos en paralelo

Consumo de combustible (l/100 km)	Control basado en reglas	Óptima global	Control ECMS (<i>equivalent consumption minimization strategy</i>)	Control simple en tiempo real
UDDS	4,85	2,97	3,17	3,21
HWFET	4,25	2,68	2,67	2,79

Nota: elaborada a partir de [Gao et al. \(2017\)](#).

En la configuración híbrida (*full hybrid*), el menor consumo de combustible (3,51 litros/100 km) se da con la estrategia de control dinámico en un ciclo UDDS; en cuanto a los vehículos híbridos en paralelo, el control ECMS muestra un ahorro de combustible 2,97 litros/100km para el mismo ciclo de conducción, con lo que se demuestra la importancia de áreas como control y optimización en los vehículos híbridos y eléctricos, pues de estas depende la correcta sincronía entre los sistemas de propulsión y el uso óptimo de la energía del vehículo.

Estudio económico de los VEH

Los costos de un vehículo en general no solamente están relacionados con la economía de combustible, también se deben tener en cuenta otros costos: de compra, mantenimiento y depreciación. Para analizarlos se han realizado diversos estudios y comparaciones entre vehículos con motores térmicos (VMT) y los VEH, los cuales han demostrado la ventaja económica de los VEH sobre los VMT, gracias a beneficios como el bajo costo operativo, lo que ubica a los VEH en una posición privilegiada en el mercado automotor ([Propfe et al., 2012](#); [Granovskii et al., 2006](#)).

Otro punto a favor de los VEH son los beneficios sociales los cuales se evalúan mediante cálculos de costos externos como disminución de la contaminación auditiva (emisión de ruidos), uso de aceites y emisión de gases contaminantes. Para este tipo de cálculos se recurre a métodos de costos externos ([Delucchi, 2004](#)). Los costos externos de los VEH tienden a ser más bajos que en los VMT, debido en gran parte a la reducción en el costo del uso de aceites. Los resultados de los estudios de costos externos muestran que los VEH son más competitivos que los VMT, aun con precios bajos de combustible ([Lipman y Delucchi, 2006](#)).

Tabla 4. Costos VEH en Colombia

Tipo de costo (2021)	Toyota Corolla 1.8 CVT SEG	KIA Niro II 1.6 Emotion aut.
Precio de compra	USD25 145 (Novamotors.com.co , 2024)	USD29 248 (Kia.com.co , 2024)
Costo de la energía kWh (estratos 3 y 4 en Bogotá)	USD0,15 (Enel-Codensa , 2021)	USD0,15 (Enel-Codensa , 2021)
Costo galón de gasolina corriente (Bogotá)	USD2,34 (MinEnergía , 2022)	USD2,34 (MinEnergía , 2022)
Costo de mantenimiento preventivo 1 año o 10 000 km	USD77,5 (Toyota , 2021)	USD193,22 (KIA Motors Servicio Técnico , 2021)
Impuesto sobre vehículos (2,5 %)	USD628,62 (Secretaría Distrital de Hacienda , 2021)	USD731,18 (Secretaría Distrital de Hacienda , 2021)

Nota: elaborada a partir de varias fuentes.

Costos de adquisición

Los VEH son cada vez más populares a nivel mundial, pero su precio de compra puede ser mucho más alto que el de los VMT, debido en gran parte al costo de las baterías. Sin embargo, pasados los primeros cinco años de inversión, los VEH alcanzan un equilibrio económico con los VMT y logran ser más económicos; así, producen un beneficio particular y social ([Lewis et al., 2012](#)).

Costos de operación

En el caso de los VEH, los costos de operación incluyen también los de combustible y de energía eléctrica, los cuales dependen de la eficiencia del sistema motor del vehículo, de la distancia y del costo del hidrocarburo (gasolina) ([Abas et al., 2019](#)). En la ecuación (1) se describe el cálculo de este tipo de costo:

$$C_{VEH} = \eta_{VEH} \cdot D \cdot C_{gas} \quad (1)$$

Donde η_{VEH} es la eficiencia del sistema motor, D es la distancia recorrida, C_{gas} es el costo de la gasolina.

Costos de mantenimiento

En este tipo de costos se incluyen los costos de mantenimiento preventivo (MFi), remplazo de baterías (BRi), tasa de descuentos (r) y el remplazo de llantas (TRi). El mantenimiento

correctivo no se tiene en cuenta, debido a la inexactitud de ocurrencia. La cantidad de mantenimientos preventivos al año es otorgada por el fabricante. En la ecuación (2) se calcula el costo de mantenimiento (Abas *et al.*, 2019):

$$\sum_{i=1}^n \frac{MF_i + BR_i + TR_i}{(1+r)^i} \quad (2)$$

Tabla 5. Costos de compra y funcionamiento de un VEH en Colombia

Tipo de costo	Toyota Corolla 1,8 CVT SEG	KIA Niro II 1,6 Emotion aut.
Costos de adquisición	USD29 254 (Novamotors.com.co , 2024)	USD30 264 (Kia.com.co , 2024)
Costos de operación (combustible-100 km)	USD2,10	USD2,35
Costos de mantenimiento*	USD628,62	USD731,18

Nota: *10 000 km o 1 año, sin cambio de baterías ni remplazo de llantas. Elaborada a partir de ecuaciones y (novamotors.com.co, 2024) y (www.kia.com.co, 2024)

El Toyota Corolla híbrido tiene un consumo de combustible de 4,5 litros cada 100 km (United States Environmental Protection Agency, 2020). En el caso del Kia Niro HEV, Kia Motors asegura que el consumo de combustible de su vehículo híbrido en modo urbano es de 3,8 litros cada 100 km (Press.kia.com, 2020).

Los resultados de la comparación de costos y consumo entre los dos vehículos híbridos es simplemente informativa, pues no se pretende recomendar una marca o VEH en especial, pero sí demostrar el ahorro de combustible que este tipo de tecnología vehicular tiene al ser comparada con la tecnología tradicional de motores térmicos, por ejemplo con el Ford Fiesta FWD 2019, el cual tiene un consumo de combustible de 7,5 litros cada 100 km (United States Environmental Protection Agency, 2019), con lo cual se demuestra un ahorro aproximado del 50 % de combustible a favor de la tecnología híbrida.

Discusión

A pesar de las mejoras económicas y sociales que trae la tecnología híbrida para la movilidad, aún se presentan varias opciones de mejora desde el punto de vista operativo y eléctrico; por ejemplo, los motores eléctricos que usan este tipo de vehículos aún tienen varios nichos de investigación que convergen en la eficiencia energética. Estos motores eléctricos buscan características par/velocidad cercanas al rendimiento ideal, al mismo tiempo que intentan reducir

las pérdidas propias de un proceso electromotor; sin embargo, aún falta seguir investigando los materiales con los que se construye este tipo de motores; por ejemplo, las aleaciones de materiales magnéticos para la construcción del núcleo de las máquinas eléctricas pueden lograr una mayor densidad de flujo magnético y con ello reducir el tamaño y masa de estas. Aunque, en el caso de la aleación CoFe (cobalto-hierro) los costos de fabricación son un poco más altos, esto se compensa con una menor masa, lo cual hace útil a esta aleación en aplicaciones espaciales, de aviación y de movilidad terrestre, como en caso de los sistemas eléctricos e híbridos ([Krings et al., 2017](#)).

En los vehículos híbridos se utilizan convertidores DC-DC elevadores de tensión para conectar las unidades de almacenamiento de baja tensión al accionamiento del motor. Empero, este tipo de convertidores elevadores DC-DC presentan resistencias parásitas en los devanados de los inductores, las cuales han demostrado afectar la eficiencia y ganancia de tensión del convertidor, de ahí que actualmente se realicen investigaciones que buscan encontrar el convertidor DC-DC ideal para este tipo de vehículos, teniendo en cuenta las necesidades propias de cada vehículo ([Martínez et al., 2018](#)). En este punto sobresalen áreas de la Ingeniería Eléctrica como la electrónica de potencia, en el diseño y desarrollo de convertidores de tensión, los cuales han demostrado ser vitales en innumerables aplicaciones, entre ellas la movilidad híbrida y eléctrica.

Las baterías de polímero de iones de litio (Li-ion) son muy populares en el almacenamiento de energía en los VEH. No obstante, se espera que la demanda de Li aumentará de 0,036 millones de toneladas en 2020 a 0,62-0,77 millones de toneladas en 2050 ([Xu et al. 2020](#)), lo cual está generando una sobreexplotación de materia prima. Esta crea la necesidad de investigar nuevos materiales que suplan esta demanda, mejorar las técnicas de reciclaje de baterías a través de la pirometalurgia ([Doose et al., 2021](#)) o seguir desarrollando los sistemas de almacenamiento de energía híbridos que agregan a las baterías de iones de litio unos supercondensadores y pilas de combustible de polímero electrolítico de membrana (PEM) ([Liu et al., 2019](#)). La Ingeniería Eléctrica y la ciencia e ingeniería de materiales surgen una vez más como pilares para el desarrollo de sistemas eléctricos, que permitan suplir la creciente demanda de energía y su almacenamiento.

El frenado regenerativo es vital en el aprovechamiento de la energía cinética del vehículo al transformarla en energía eléctrica. A pesar de ello, el frenado regenerativo no es la única forma de aprovechamiento de energía cinética que se puede tener en los vehículos híbridos o eléctricos, pues los materiales piezoeléctricos también pueden aprovechar la energía cinética generada durante el frenado ([Khandwala et al., 2020](#)) la presión del vehículo en el sistema de suspensión ([Varela, 2020](#)) o la energía vibratoria causada en el movimiento del rotor a través

de un soporte de material piezoeléctrico ([Dannier et al., 2019](#)).

Las estrategias de control en combinación con técnicas de optimización son fuente de investigación para diversas áreas de ingeniería, donde por ejemplo se puede controlar la sincronía motriz entre dos sistemas de propulsión (uno eléctrico y otro térmico), sin dejar de lado la optimización de los recursos energéticos provenientes de baterías o combustible. Esto resalta la importancia de la teoría de control, el análisis de sistemas dinámicos y la optimización en las ingenierías Eléctrica, Electromecánica, Mecánica y afines, pues el desarrollo de la movilidad híbrida requiere de ingenieros capaces de controlar y desarrollar sistemas motrices eficientes desde el punto de vista energético y ambiental.

Las normas IEC 61851 e IEC 61851-1, citadas en el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE), establecen los requisitos técnicos que deben cumplir las estaciones de carga para los vehículos eléctricos o híbridos enchufables. A pesar de ello, en Colombia aún falta establecer las condiciones mínimas de estandarización y de mercado que debe cumplir la infraestructura de carga para este tipo de vehículos, pues a la fecha de elaboración de este artículo solo se cuenta con un proyecto de resolución en el Ministerio de Minas y Energía (2022), el cual establece definiciones técnicas, condiciones de mercado y estandariza criterios técnicos y normativos de las estaciones de carga. Los proyectos gubernamentales que implican energía eléctrica en Colombia requieren de un mayor número de ingenieros eléctricos comprometidos con el sector público y desarrollo del país, lo cual no solo se convierte en una fuente de empleo para los ingenieros, sino también en una mejor gestión y ejecución de proyectos eléctricos públicos.

Conclusiones

El corto plazo promete cambios en cuatro aspectos vitales para la humanidad: clima, sociedad, tecnología y recursos. Estos deben ser abordados por las diferentes ingenierías, en especial por la eléctrica, pues esta tiene en su conocimiento las herramientas para controlar y proveer recursos energéticos, al mismo tiempo que puede transformar dichos recursos, en por ejemplo, sistemas de transporte eléctricos o híbridos que permitan reducir las emisiones contaminantes, suministrando recursos energéticos seguros y confiables.

El sistema de frenado regenerativo es trascendental en el aprovechamiento de las fuerzas físicas que se generan en el vehículo. Sin embargo, los materiales piezoeléctricos también evidencian un gran potencial para el aprovechamiento de las fuerzas dinámicas y estáticas presentes en los vehículos híbridos, en pro de la autonomía energética, lo cual los convierte en un área de investigación para el desarrollo de la movilidad sostenible.

En los motores eléctricos de los vehículos híbridos, como en cualquier otro sistema electromotor, es importante el rendimiento y eficiencia del motor, así como su comportamiento par/velocidad. Sin embargo, la masa y tamaño de los motores sobresalen al momento de diseñar un vehículo, de ahí la importancia de los materiales con los que se construyen los motores, pues al ser contruidos con materiales de una mayor densidad de flujo magnético se logra reducir la masa y tamaño de estos, aunque esto implique consideraciones costo/beneficio.

Los convertidores de tensión son vitales en el ensamble y funcionamiento eléctrico de un vehículo híbrido, pues estos son un eslabón en la cadena de la eficiencia energética de un vehículo. Por eso es vital la investigación y desarrollo de convertidores para uso específico de los vehículos híbridos, donde se diseñen teniendo en cuenta no solo el propósito final sino también el sistema en sí.

Uno de los cuestionamientos más grandes acerca de los vehículos híbridos y eléctricos es la autonomía del sistema eléctrico, la cual depende en gran parte de las baterías. En la actualidad estas son objeto de investigación, pues no solo se busca un mejor rendimiento, sino también controlar el impacto ambiental que causan. La Ingeniería Eléctrica y la ciencia e ingeniería de materiales tienen la capacidad de proveer sistemas de almacenamiento de energía a través de la investigación de nuevos materiales o aleaciones que permitan suplir las necesidades energéticas de los sistemas eléctricos móviles, sin afectar o sobreexplotar los recursos naturales, de ahí la necesidad de fomentar en las universidades la investigación sobre la generación, transformación y almacenamiento de energía ecológicamente sostenible.

Referencias

- Abas, A. E. P., Yong, J., Mahlia, T. M. I. y Hannan, M. A. (2019). Techno-economic analysis and environmental impact of electric vehicle. *IEEE Access*, 7, 98565-98578. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2929530>
- Asghar, M., Bhatti, A. I., Ahmed, Q. y Murtaza, G. (2018). Energy management strategy for Atkinson cycle engine based parallel hybrid electric vehicle. *IEEE Access*, 6, 28008-28018. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2835395>
- Asociación Nacional de Empresarios de Colombia (ANDI). (2021). *Informe de vehículos eléctricos e híbridos a enero 2021*. https://www.andi.com.co/Uploads/01.%20INFORME%20DE%20VEHICULOS%20H&E%20ENE%20%20-%20PRENSA_637487206531776842.pdf

- Buecherl, D., Bolvashenkov, I. y Herzog, H. G. (2009). Verification of the optimum hybridization factor as design parameter of hybrid electric vehicles. En *5th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC '09* (pp. 847-851). IEEE. <https://doi.org/10.1109/VPPC.2009.5289758>
- Chele Sancan, D. G. (2017). Vehículos híbridos, una solución interina para bajar los niveles de contaminación del medio ambiente causados por las emisiones provenientes de los motores de combustión interna. *INNOVA Research Journal*, 2(12), 1-10. <https://doi.org/10.33890/innova.v2.n12.2017.527>
- Chen, P. T., Pai, P. H., Cheng Jung, Y. y David, H. K. (2019). Development of transmission systems for parallel hybrid electric vehicles. *Applied Sciences*, 9(8), 1-26. <https://doi.org/10.3390/app9081538>
- Cipek, M., Kasać, J., Pavković, D. y Zorc, D. (2020). A novel cascade approach to control variables optimisation for advanced series-parallel hybrid electric vehicle power-train. *Applied Energy*, 276, 115488. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115488>
- Coffman, M., Bernstein, P. y Wee, S. (2017). Electric vehicles revisited: A review of factors that affect adoption. *Transport Reviews*, 37(1), 2-3. <https://doi.org/10.1080/01441647.2016.1217282>
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. (2020). *El ciclo Atkinson y su presencia en los vehículos híbridos*. <https://drive.google.com/file/d/11bYiCLHIP6nJEgJT70C568yyXL-79kc/view>
- Costa, G. (2010). Reducing electricity cost through use of premium efficiency motors. *Power Transmission Engineering*, 6(1), 38-43. https://www.academia.edu/25302001/Reducing_Electricity_Cost_through_Use_of_Premium_Efficiency_Motors
- Dannier, A., Brando, G. y Ruggiero, F. N. (2019). The piezoelectric phenomenon in energy harvesting scenarios: A theoretical study of viable applications in unbalanced rotor systems. *Energies*, 12(4), 1-15. <https://doi.org/10.3390/en12040708>
- Delucchi, M. A. (2004). *Summary of the nonmonetary externalities of motor-vehicle use: Report #9 in the series*. University of California.
- Doose, S., Mayer, J. K., Michalowski, P. y Kwade, A. (2021). Challenges in ecofriendly battery recycling and closed material cycles: A perspective on future lithium battery generations. *Metals*, 11(2), 291. <https://doi.org/10.3390/met11020291>
- Durán Tovar, I. C., Marulanda Guerra, A. R., Monroy Laverde, C. C. y Siachoque Ardila, C. A. (2020). Estudio comparativo del sistema de freno regenerativo y regeneración con energía

- cinética constante en vehículos eléctricos de batería. *Ingeniería*, 25(3). <https://doi.org/10.14483/23448393.16220>
- Ehsani, M., Gao, Y., Gay, S. E. y Emadi, A. (2005). *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles*. Taylor & Francis.
- Emadi, A., Lee, Y. J. y Rajashekara, K. (2008). Power electronics and motor drives in electric, hybrid electric, and plug-in hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(6), 2237-2245. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.922768>
- Enel-Codensa. (2021). *Tarifas de energía*. <https://www.enel.com.co/content/dam/enel-co/espaÃsol/personas/1-17-1/2021/Tarifario-abril-2021.pdf>
- Gao, A., Deng, X., Zhang, M. y Fu, Z. (2017). Design and validation of real-time optimal control with ECMS to minimize energy consumption for parallel hybrid electric vehicles. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, 1-11. <https://doi.org/10.1155/2017/3095347>
- Granovskii, M., Dincer, I. y Rosen, M. A. (2006). Economic and environmental comparison of conventional, hybrid, electric and hydrogen fuel cell vehicles. *Journal of Power Sources*, 159(2), 1186-1193. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.11.086>
- Holder, C. y Gover, J. (2006). Optimizing the hybridization factor for a parallel hybrid electric small car. En *2006 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2006* (pp. 1-5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/VPPC.2006.364359>
- Hwang, K., Hwang, I., Lee, H., Park, H., Choi, H., Lee, K., Kim, W., Kim, H., Han, B., Lee, J., Shin, B. y Chae, D. (2016). Development of new high-efficiency Kappa 1.6L GDI engine. *SAE Technical Papers*, 2016(01), 0667. <https://doi.org/10.4271/2016-01-0667>
- Jones, D. (2014). *Brushless PM-motors speed ahead*. PowerTransmission.com. <https://www.powertransmission.com/ext/resources/issues/0614/brushless-pm-motors.pdf?1646351811>
- Karden, E., Ploumen, S., Fricke, B., Miller, T. y Snyder, K. (2007). Energy storage devices for future hybrid electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 168(1), 2-11. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.10.090>
- Kebriaei, M., Niasar, A. H. y Asaei, B. (2015). Hybrid electric vehicles: An overview. En *International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE)*, 2015 (pp. 299-305). Shenzhen, China. <https://doi.org/10.1109/ICCVE.2015.84>
- Khandwala, D., Pandya, P., Ladani, B., Khatri, P. y Patel, J. (2020). Design and development of multiple alternative energy car. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 9(3), 1247-1252. <https://doi.org/10.35940/ijitee.C8701.019320>

- KIA Motors Servicio Técnico. (2021). *Talleres MetroKia*. <https://metrokia.co/talleres-metrokia-kia-motors/>
- Kia.com.co (2024). *Niro Híbrido*. <https://www.kia.com.co/nuestros-vehiculos/hibrido-niro>
- Kniro.net. (2017). *Kia Niro: Hybrid control system / Hybrid power control unit (HPCU) components and components location*. http://www.knir.net/hybrid_power_control_unit_hpcu_components_and_components_location-717.html
- Krings, A., Cossale, M., Tenconi, A., Soulard, J., Cavagnino, A. y Boglietti, A. (2017). Magnetic materials used in electrical machines: A comparison and selection guide for early machine design. *IEEE Industry Applications Magazine*, 23(6), 21-28. <https://doi.org/10.1109/MIAS.2016.2600721>
- Kumar, A. y Thakura, P. R. (2019). Performance evaluation of hybrid electric vehicles for sustainable transport system. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 8(11), 1-11. <https://doi.org/10.35940/ijitee.K1280.0981119>
- Labriola, D. (2020). *Hybrid transverse magnetic flux motors-AKA stepper motors and hybrid servos*. PowerTransmission.com. <https://www.powertransmission.com/ext/resources/issues/0320/stepper-motors.pdf?1646351985>
- Lewis
- Lewis, H., Park, H. y Paolini, M. (2012). Frontier battery development for hybrid vehicles. *Chemistry Central Journal*, 6(Suppl. 1), S2. <https://doi.org/10.1186/1752-153X-6-S1-S2>
- Li, Y., Wang, S., Duan, X., Liu, S., Liu, J. y Hu, S. (2021). Multi-objective energy management for Atkinson cycle engine and series hybrid electric vehicle based on evolutionary NSGA-II algorithm using digital twins. *Energy Conversion and Management*, 230, 113788. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113788>
- Lipman, T. E. y Delucchi, M. A. (2006). A retail and lifecycle cost analysis of hybrid electric vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 11(2), 115-132. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2005.10.002>
- Liu, J., & Peng, H. (2008). Modeling and control of a power-split hybrid vehicle. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 16(6), 1242-1251. <https://doi.org/10.1109/TCST.2008.919447>
- Liu, Z., Kendall, K., & Yan, X. (2019). China progress on renewable energy vehicles: Fuel cells, hydrogen and battery hybrid vehicles. *Energies*, 12(1), 54. <https://doi.org/10.3390/en12010054>

- Martínez, W., Cortes, C., Yamamoto, M. e Imaoka, J. (2018). Effect of inductor parasitic resistances on the voltage gain of high step-up DC-DC converters for electric vehicle applications. *IET Power Electronics*, 11(10), 1628-1639. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2017.0361>
- Marzougui, H., Kadri, A., Martin, J. P., Amari, M., Pierfederici, S. y Bacha, F. (2019). Implementation of energy management strategy of hybrid power source for electrical vehicle. *Energy Conversion and Management*, 195, 830-843. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.05.037>
- Ministerio de Minas y Energía (MinEnergía). (2022). *Precios de combustibles año 2022*. <https://www.minenergia.gov.co/es/misional/hidrocarburos/funcionamiento-del-sector/downstream/>
- Montazeri-Gh, M., Poursamad, A. y Ghalichi, B. (2006). Application of genetic algorithm for optimization of control strategy in parallel hybrid electric vehicles. *Journal of the Franklin Institute*, 343(4-5), 420-435. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2006.02.015>
- Navale, V. y Havens, T. C. (2014). Fuzzy logic controller for energy management of power split hybrid electrical vehicle transmission. En *2014 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)* (pp. 940-947). IEEE. <https://doi.org/10.1109/FUZZ-IEEE.2014.6891785>
- Novamotors.com.co. (2024). *Toyota Corolla Hybrid SE*. <https://www.novamotors.com.co/toyota/automoviles/corolla/corolla-hybrid-seg/>
- Orecchini, F., Santiangeli, A., Zuccari, F., Ortenzi, F., Genovese, A., Spazzafumo, G. y Nardone, L. (2018). Energy consumption of a last generation full hybrid vehicle compared with a conventional vehicle in real drive conditions. *Energy Procedia*, 148, 289-296. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.080>
- Pérez, L. V., Bossio, G. R., Moitre, D. y García, G. O. (2006). Optimization of power management in a hybrid electric vehicle using dynamic programming. *Mathematics and Computers in Simulation*, 73(1-4), 244-254. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2006.06.016>
- Press.kia.com. (2020). *Especificaciones técnicas KIA Niro (híbrido)*. <https://press.kia.com/content/dam/kiapress/ES/mediagallery/Especificaciones%20T%C3%A9cnicas%20Kia%20Niro.pdf>
- Program of the U.S. Department of Energy. (2014). *Determining electric motor load and efficiency*. Motor Challenge. <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/04/f15/10097517.pdf>

- Propfe, B., Redelbach, M., Santini, D. J. y Friedrich, H. (2012). Cost analysis of plug-in hybrid electric vehicles including maintenance & repair costs and resale values. *World Electric Vehicle Journal*, 5(4), 886-895. <https://doi.org/10.3390/wevj5040886>
- Sánchez, R. (2009). *Impacto en la demanda de energía eléctrica en Colombia debido a la penetración de vehículos híbridos-eléctricos y eléctricos* [Trabajo de grado]. Universidad Nacional de Colombia.
- Schouten, N. J., Salman, M. A. y Kheir, N. A. (2002). Fuzzy logic control for parallel hybrid vehicles. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 10(3), 460-468. <https://doi.org/10.1109/87.998036>
- Secretaría Distrital de Hacienda. (2021). *Impuesto sobre vehículos automotores*. <https://www.haciendabogota.gov.co/es/impuestos/impuesto-sobre-vehiculos-automotores>
- Shen, C., Shan, P. y Gao, T. (2011). A comprehensive overview of hybrid electric vehicles. *International Journal of Vehicular Technology*, 2011, 1-7. <https://doi.org/10.1155/2011/571683>
- Toyota.es. (2017). *Componentes del sistema híbrido Toyota*. <https://www.toyota.es/world-of-toyota/articles-news-events/2017/componentes-sistema-hibrido-toyota>
- Toyota.mx. (2020). *Ficha técnica Corolla HV 2020*. https://www.toyotacoapa.com.mx/autosnuevos/pdf/CORH20/Ficha_técnica.pdf
- Toyota.com.co. (2021). *Mantenimiento planeado*. <https://www.toyota.com.co/mantenimiento-planeado/>
- United States Environmental Protection Agency. (2019). *Government source for fuel economy information*. <https://www.fueleconomy.gov/feg/noframes/40813.shtml>
- United States Environmental Protection Agency. (2020). *Government source for fuel economy information*. <https://www.fueleconomy.gov/feg/noframes/41214.shtml>
- Universidad de los Andes. (2013). *Diseño y fabricación de convertidores de energía basados en el concepto de bloques constructivos de electrónica de potencia (PEBB)*. <https://repositorio.uniandes.edu.co/statistics/items/e7ed1b65-f6da-40a7-b523-8e1a57939638>
- Varela, C. (2020). Kinetic energy applications in autonomous and sustainable electromobility. *Revista UIS Ingenierías*, 19(4), 167-180. <https://doi.org/10.18273/revuin.v19n4-2020015>
- Vecchio, A., Van der Auweraer, H., Janssens, K. y Deblauwe, F. (2005). Booming noise study on hybrid cars. En *International Congress on Noise Control Engineering 2005, INTERNOISE 2005* (Vol. 5, pp. 3983-3992). Rio de Janeiro, Brasil.

- Xia, W., Mahmood, A., Zou, R. y Xu, Q. (2015). Metal-organic frameworks and their derived nanostructures for electrochemical energy storage and conversion. *Energy & Environmental Science*, (7), 1837-1866. <https://doi.org/10.1039/C5EE00762C>
- Xu, C., Dai, Q., Gaines, L., Hu, M., Tukker, A. y Steubing, B. (2020). Future material demand for automotive lithium-based batteries. *Communications Materials*, 1, 99. <https://doi.org/10.1038/s43246-020-00095-x>

