

Optimización de la Operación de Fuentes de Energía en Vehículos Híbridos Eléctricos Mediante Modelación Matemática

Optimization of Energy Source Operation in Hybrid Electric Vehicles Using Mathematical Modeling

Wilson Andrés Ramírez Montesdeoca

Universidad Nacional de Chimborazo (UNACH),
Riobamba, Ecuador.

<https://orcid.org/0000-0002-1931-0792>

wandresrm@gmail.com

Víctor Herrera-Pérez

Universidad San Francisco de Quito (USFQ), Colegio
de Ciencias e Ingenierías, Quito, Ecuador.

<https://orcid.org/0000-0002-8125-0727>

vherrera@usfq.edu.ec

Jéssica Alexandra Marcatoma-Tixi

Universidad Nacional de Chimborazo (UNACH),
Riobamba, Ecuador.

jessica.marcatoma@unach.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-9531-3234>

Alexandra Pazmiño-Armijos

Escuela Superior Politécnica Chimborazo
(ESPOCH), Riobamba, Ecuador.

apazmino_a@epoch.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-5111-7968>



Imaginario Social

Entidad editora

REDICME (reg-red-18-0061)

e-ISSN: 2737-6362

mayo especial 2023 Vol. 6-2-2023

[http://revista-](http://revista-imaginariosocial.com/index.php/es/index)

[imaginariosocial.com/index.php/es/index](http://revista-imaginariosocial.com/index.php/es/index)

Recepción: 10 de marzo de 2023

Aceptación: 20 de abril de 2023

41-64

Atribución/Reconocimiento-NoComercial- CompartirIgual 4.0 Licencia
Pública Internacional — CC

BY-NC-SA 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/legalcode.es>

Resumen

Este trabajo de investigación presenta los modelos matemáticos de los sistemas eléctricos y de tracción que intervienen en la operación de un vehículo híbrido eléctrico. El modelado se aborda desde un enfoque backward para definir el flujo de energía entre el tren eléctrico y de tracción y cuantificar los consumos de combustible y energéticos.

Se emplea una optimización basada en algoritmo genético y una estrategia de control tipo *Flip – Flop SR*, para determinar la óptima operación y dimensionamiento de la batería en tres diferentes ciclos de conducción estandarizados. Se presenta un estudio comparativo de consumo de combustible entre un vehículo de combustión interna y un vehículo híbrido eléctrico optimizado. Como conclusión general, de los tres ciclos de conducción y con los parámetros de vehículos analizados, el vehículo híbrido eléctrico optimizado consume alrededor de 36,8% menos de combustible que un vehículo de combustión interna. El modelo matemático y la metodología propuesta permite simular y optimizar vehículos híbridos eléctricos bajo diferentes grados de hibridación y condiciones de operación.

Palabras clave: vehículo híbrido eléctrico, modelo matemático, algoritmo genético, consumo de combustible, reducción de emisiones contaminantes.

Abstract

This research work presents the mathematical models of the electrical and traction systems involved in the operation of a hybrid electric vehicle. The modeling is faced from a backward approach to define the energy flow between the electric and traction train and quantify fuel and energy consumption. An optimization based on a genetic algorithm and a Flip-Flop SR type control strategy are used to determine the optimal operation and sizing of the battery under three different standardized driving cycles. A comparative study of fuel consumption between an internal combustion vehicle and an optimized electric hybrid vehicle is presented. As a general conclusion, from the three driving cycles and with the vehicle parameters analyzed, the optimized hybrid electric vehicle consumes around 36.8% less fuel than an internal combustion vehicle. The mathematical model and the proposed methodology allow simulating and

optimizing electric hybrid vehicles under different degrees of hybridization and operating conditions.

Key words: hybrid electric vehicle, mathematical model, genetic algorithm, fuel consumption, reduction of pollutant emissions.

Introducción

El tratado internacional sobre el cambio climático desarrollado en París en diciembre del 2015, pretende como objetivo principal limitar el calentamiento mundial a 2°C o preferiblemente a 1.5°C, en comparación con los niveles preindustriales; para lograr un planeta con clima neutro para mediados de siglo (United Nations , 2022). El CO_2 representa el 82% del aumento de efecto invernadero (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2022).

El sector del transporte es un fuerte generador de CO_2 representando alrededor del 13% de un total de 56,6% debido al uso de combustibles fósiles (Rios Bedoya et al., 2016). Según el Pacto Verde Europeo, hay que disminuir un 90% de las emisiones de gases de efecto invernadero del transporte para el año 2050 con respecto a los niveles de 1990, para alcanzar la neutralidad climática (Parlamento Europeo, 2019).

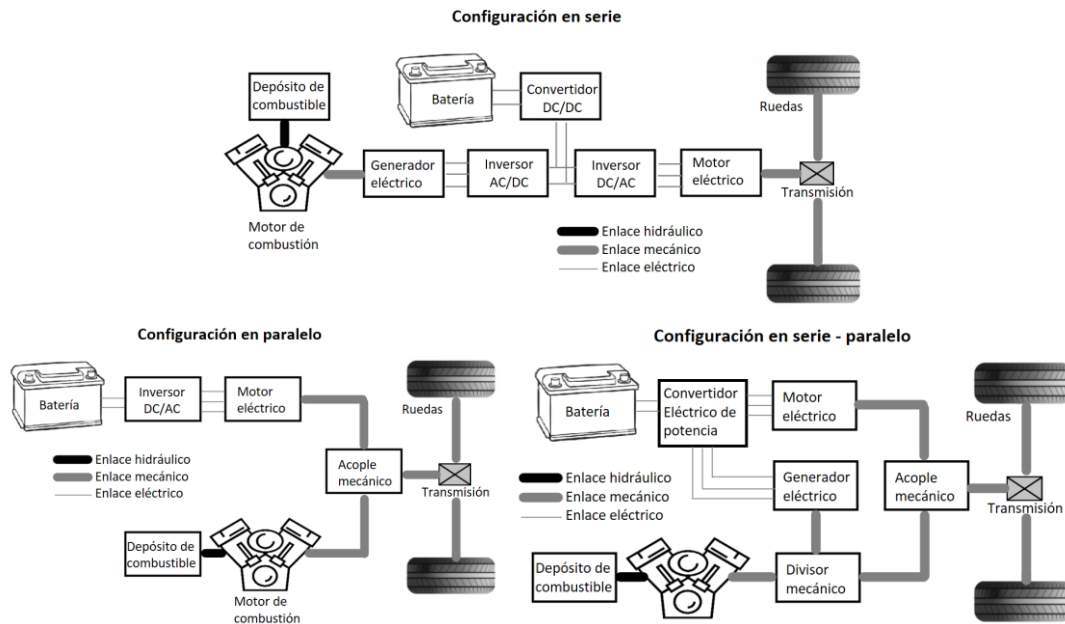
Actualmente existe una amplia variedad de vehículos híbridos eléctricos que ofertan los diferentes fabricantes como propuesta a la disminución del CO_2 . Los Mild Hybrid Electric Vehicle (*MHEV*), como el Ford Fiesta 5p ST-Line 1.0 EcoBoost que desarrolla una potencia de 155 CV y posee un motor eléctrico de 16 CV - 48 V con capacidad de 0.38 kWh, estos vehículos, llevan un pequeño motor eléctrico (*ME*) que funciona en momentos puntuales, ayuda al freno regenerativo y como motor de arranque. Por otro lado, también existen los Hybrid Electric Vehicle (*HEV*), como el Toyota RAV4 Hybrid 2WD Advance que desarrolla una potencia de 197 CV y posee un motor eléctrico de 143 CV - 245 V con capacidad de 1.59 kWh, estos vehículos, son híbridos no enchufables que pueden mover al vehículo en modo eléctrico por pocos kilómetros. Por su parte, los Plug-in Hybrid Electric Vehicle (*PHEV*), como el Hyundai IONIQ que desarrolla una potencia de 141 CV y posee un motor eléctrico de 61 CV - 360 V con capacidad de 8.9 kWh, estos vehículos, son híbridos enchufables que pueden circular en una operación puramente eléctrica durante una distancia significativa de kilómetros ya

que poseen una batería (*BT*) y un *ME* encargado de propulsar el vehículo. Por último, los Battery Electric Vehicle (*BEV*), como el Renault ZOE iconic que desarrolla una potencia de 136 CV – 400 V con capacidad útil de 52 kWh, son vehículos completamente eléctricos que cuentan únicamente con una batería a bordo (Diariomotor, 2021).

En Ecuador en el 2021 se vendieron 4269 vehículos híbridos de los cuales 2483 fueron *MHEV*, 1772 *HEV* y 34 *PHEV*. Estas cifras muestran una tendencia creciente al uso de estas tecnologías las cuales están libres del impuesto a los consumos especiales (*ICE*) (Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador (AEADE), 2021).

Las configuraciones para el tren de tracción que se han implementado en vehículos híbridos eléctricos son: en serie, en paralelo y combinaciones entre ellas, mostradas en la figura 1. La configuración en serie, que es objeto de este trabajo, involucra un motor de combustión interna (*MCI*), un generador eléctrico (*GE*), un paquete de *BT*, un inversor, convertidores y un *ME* conectados mediante un bus de corriente directa (acople eléctrico).

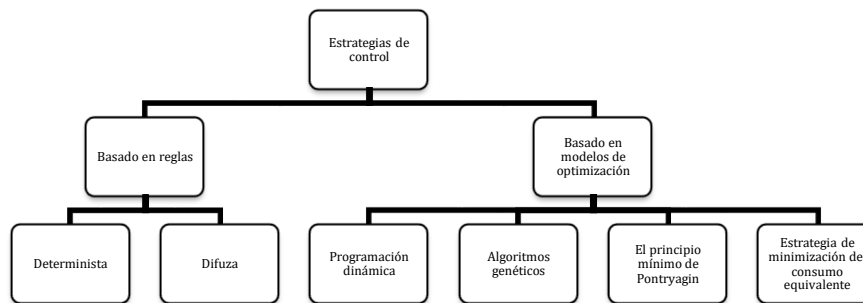
Este sistema es más eficiente en conducción dentro de ciclos urbanos, donde se conduce a bajas velocidades y con múltiples paradas y arranques. En este tipo de ciclos de conducción el motor de combustión trabaja a bajos regímenes de potencia con una baja eficiencia resultante (Herrera Pérez, 2017). En la actualidad, la configuración de tren de tracción más utilizada es la combinada (serie - paralelo), esta configuración funciona con un *MCI* y al menos dos motores eléctricos denominados *MG1* y *MG2*. En esta configuración el *MG1* se encarga del arranque del *MCI* y la recarga de las *BT*; mientras que *MG2* es el encargado de aportar potencia al tren de tracción para funcionar de manera eléctrica pura o híbrida junto con *MCI* y recuperar energía durante el frenado regenerativo.

Figura 1. Configuraciones de tren de tracción de un HEV.

Gestionar la energía disponible de un vehículo híbrido eléctrico de manera óptima es un desafío que se ha tratado con enfoques de modelado forward (hacia adelante), backward (hacia atrás) y una combinación entre ellos (Anselma y otros, 2019). En el enfoque de modelado forward, la aceleración, velocidad y consumo de combustible del vehículo se calcula como consecuencia de la fuerza de tracción generada por el tren motriz y puede utilizarse para el desarrollo de estrategias de control en línea. Por otro lado, en el enfoque de modelado backward, el vehículo sigue un perfil de velocidad y aceleración prescritos, por lo que el par motor y el consumo de combustible son salidas, siendo adecuado para la evaluación preliminar de estrategias de gestión de energía (Onori y otros, 2016).

En este trabajo se utilizó un enfoque de modelado backward para determinar el consumo de combustible de un HEV con una configuración en serie, el cual sigue un ciclo de conducción preestablecido subdividiéndose en pequeños intervalos de tiempo (muestreo), en donde se aplica un enfoque de punto de operación promedio, asumiendo que la velocidad, el par y la aceleración permanecen constantes (Onori y otros, 2016).

Algunas de las estrategias de control para la gestión de energía, desde el enfoque backward, se muestran en la figura 2.

Figura 2. Estrategias de control para la gestión de energía de un HEV.

Basadas en reglas (Chen y otros, 2022), se apoyan en la heurística, la intuición, experiencia para definir los diferentes modos de operación y condiciones de operación en cada uno de ellos. Uno de estos métodos es el determinista, que se apoya en la experiencia humana y el conocimiento sobre la aplicación. Otro método es el basado en reglas difusas, el cual puede tratar problemas y modelos de sistemas más complejos evitando la rigidez matemática (Herrera Pérez, 2017). Por otro lado, se puede mencionar, las estrategias basadas en modelos de optimización, las cuales minimizan una función de costo. Como la programación dinámica (*DP*), que encuentra la solución óptima global (Lee y otros, 2015). Algoritmos genéticos (*GA*), que, basado en la naturaleza, escoge las mejores soluciones de las variables en análisis. El principio mínimo de Pontryagin (*PMP*) (Tang y otros, 2015), que tiene la propiedad de ser discreto, tener menos costo computacional que *DP* y de poder ser implementable. La estrategia de minimización del consumo equivalente (*ECMS*), que puede ser la base de estrategias de administración de energía adaptativa (Guan & Chen, 2019). En este trabajo de investigación se utilizó una estrategia *GA* para determinar el óptimo de la capacidad de energía de la batería ($C_{p_{eng}}$) y, una estrategia de control de *Flip – Flop SR*, para el control de estado de carga de la *BT* de un *HEV* en serie.

Metodología

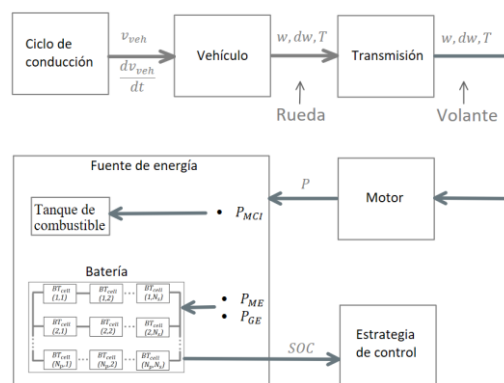
Modelado de un HEV

El poder modelar matemáticamente un problema del mundo real, permite analizar y determinar soluciones, por medio de estrategias de control, que pueden ser implementadas en los diferentes sistemas modelados, con la ventaja de ser económico,

rápido y sin comprometer al medio ambiente. Los *HEV* no son la excepción y han sido objeto de muchos estudios en los últimos años, con la finalidad de encontrar mejores formas de aumentar su eficiencia, al mejorar su mecánica y optimizar sus fuentes de energía.

El flujograma de la figura 3, muestra, con un enfoque backward, el orden secuencial para determinar el consumo de energía que requiere un *HEV*, en un viaje específico (ciclos de conducción). Los bloques de la figura 3, representan los diferentes modelos matemáticos a considerar en el cálculo del consumo energético de un *HEV* y, se observa que tienen magnitudes físicas tanto en la entrada como en la salida de los mismos. El bloque de ciclo de conducción, tiene como salida, la velocidad (v_{veh}) y aceleración del vehículo ($\frac{dv_{veh}}{dt}$). El bloque vehículo, tiene como entrada v_{veh} y $\frac{dv_{veh}}{dt}$, como salida tiene la velocidad angular (ω_{rd}), aceleración angular ($d\omega_{rd}$) y torque de la rueda (T_{rd}). El bloque transmisión, tiene como entrada ω_{rd} , $d\omega_{rd}$ y T_{rd} , como salida tiene la velocidad angular (ω_{trans}), aceleración angular ($d\omega_{trans}$) y torque en el volante (T_{trans}). El bloque motor, tiene como entrada ω_{trans} , $d\omega_{trans}$ y T_{trans} , como salida tiene la potencia del *MCI* (P_{MCI}) o la potencia del *ME* (P_{ME}) o la potencia del *GE* (P_{GE}). El bloque fuente de energía, se divide en el bloque tanque de combustible, cuya entrada es P_{MCI} , como salida, calcula el consumo de combustible consumido por el *MCI*. El bloque batería, tiene como entrada P_{ME} o P_{GE} o la combinación de ambos, como salida, calcula el estado de carga de la *BT* (*SOC*). Finalmente, el bloque estrategia de control, tiene como entrada *SOC*, el cual es un parámetro de control y, como salida, permitirá o no la carga de la *BT* por medio del *MCI* y *GE*.

Figura 3. Flujo de trabajo del enfoque hacia atrás (backward).

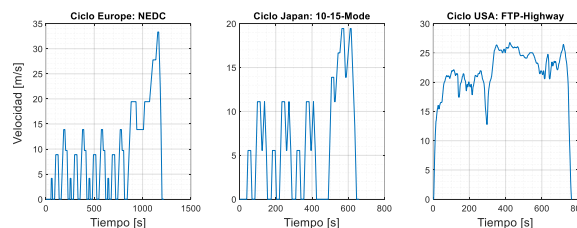


Para determinar el ahorro de combustible que brinda un **HEV** frente a un vehículo convencional, se simularon ambas tecnologías, con parámetros de vehículos SUV de similares características, como se muestra en la tabla 1. Las gráficas de la figura 11, 12 y 13, muestran el comportamiento de los vehículos simulados en los tres ciclos de conducción.

Ciclos de conducción

Los ciclos de conducción pre establecidos y normalizados son el historial de velocidad del vehículo ($v_{veh} \left[\frac{m}{s} \right]$) en un determinado viaje y sirven como punto de comparación del consumo de energía al ser comparados diferentes vehículos. En la figura 4, se representan los ciclos de conducción utilizados en este estudio. Europeo: NEDC, es un ciclo utilizado para homologaciones en Europa, el cual combina la conducción en ciudad (urbano) y de carretera (rural), considerándose un ciclo de conducción mixto. Japan: 10-15-Mode, es un ciclo de conducción en ciudad, utilizado en homologaciones en Japón. USA: FTP-Highway, es un ciclo de conducción en carretera, utilizado en homologaciones en EEUU.

Figura 4. Ciclos de conducción



Al derivar v_{veh} con respecto al tiempo (dt), se obtiene la aceleración ($dv \left[\frac{m}{s^2} \right]$), la cual se representa en la ecuación (1) y al integrar v_{veh} con respecto a dt , en un intervalo de tiempo inicial (t_o) y tiempo final (t_f), se obtiene la distancia total recorrida ($X_{TOT} [m]$), mostrada en la ecuación (2). En este bloque, también se puede anexar el número de marcha (i) a la que estará engranado la caja de cambios en función de la velocidad del vehículo.

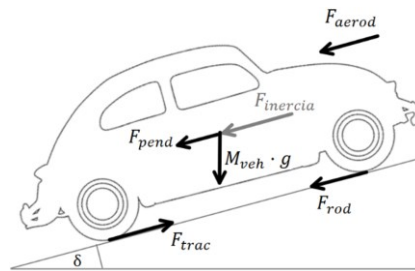
$$dv = \frac{dv_{veh}}{dt} \left[\frac{m}{s^2} \right] \quad (1)$$

$$X_{TOT} = \int_{t_o}^{t_f} v_{veh} dt [m] \quad (2)$$

Dinámica y cinemática del vehículo

El diagrama de cuerpo libre de la figura 5, muestra las fuerzas que intervienen en la dinámica del vehículo, las cuales sirven en la obtención del modelo matemático. Primero se muestra en la ecuación (3), el enfoque forward, para luego, estas magnitudes físicas, ordenándose de una forma conveniente, permiten representar el enfoque backward, mostrado en la ecuación (8).

Figura 5. Fuerzas que actúan sobre un vehículo en movimiento.



$$M_{veh} \cdot \frac{dv_{veh}}{dt} = F_{inercia} = F_{trac} - F_{rod} - F_{aerod} - F_{pend} \quad (3)$$

Donde M_{veh} [kg], representa la masa del vehículo, v_{veh} $\left[\frac{m}{s}\right]$, representa la velocidad, $F_{inercia}$ [N], representa la fuerza de inercia, F_{trac} [N], representa la fuerza de tracción que se muestra en la ecuación (4), donde F_{trmz} [N], representa la fuerza producida por el tren motriz y F_{freno} [N], representa la fuerza del freno, F_{aerod} [N] representa la resistencia aerodinámica que se muestra en la ecuación (5), F_{rod} [N] representa la resistencia a la rodadura mostrada en la ecuación (6), F_{pend} [N] representa la fuerza debida a la pendiente del camino la cual se visualiza en la ecuación (7).

$$F_{trac} = F_{trmz} - F_{freno} \quad (4)$$

$$F_{aerod} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot A_f \cdot C_d \cdot v_{veh}^2 \quad (5)$$

De la ecuación (5), se tiene que, ρ_{air} $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$, representa la densidad del aire (1.18 $\frac{kg}{m^3}$ en este estudio), A_f [m²], representa el área frontal del vehículo, C_d , representa el coeficiente de resistencia aerodinámica (0.28 – 0.38).

La fuerza de resistencia a la rodadura generalmente se modela como la ecuación (6).

$$F_{rod} = c_{rod}(v_{veh}, P_{neu}, \dots) \cdot M_{veh} \cdot g \cdot \cos(\delta) \quad (6)$$

Donde $g \left[\frac{m}{s^2} \right]$, representa la aceleración de la gravedad, δ [°], representa el ángulo de la pendiente de la carretera, $M_{veh} \cdot g \cdot \cos(\delta)$, representa la componente vertical del peso del vehículo, y C_{rod} , representa un coeficiente de resistencia a la rodadura que, en principio, es función de la velocidad del vehículo, la presión de los neumáticos, temperatura externa, etc. En este estudio C_{rod} se supone constante (0.01 – 0.03). La fuerza de pendiente es la componente horizontal debida al peso del vehículo, que se opone (o facilita) el desplazamiento del vehículo, mostrado en la ecuación (7).

$$F_{pend} = M_{veh} \cdot g \cdot \sin(\delta) \quad (7)$$

La fuerza de tracción que debe producir el tren motriz, se obtiene al reorganizar los términos de la ecuación (3) al despejar F_{trac} , la cual se muestra en la ecuación (8), misma que representa el enfoque de modelado backward.

$$F_{trac} = F_{trmz} - F_{freno} = F_{inercia} + F_{rod} + F_{aerod} + F_{pend} \quad (8)$$

Las magnitudes físicas que se calculan en este bloque son la velocidad angular de la rueda ($\omega_{rd} \left[\frac{rad}{s} \right]$), mostrado en la ecuación (9), donde R_{rd} [m] es el radio de la rueda, también se obtiene la aceleración angular de la rueda ($d\omega_{rd} \left[\frac{rad}{s^2} \right]$), mostrada en la ecuación (10), y el torque en la rueda (T_{rd} [N · m]), mostrado en la ecuación (11).

$$\omega_{rd} = \frac{v_{veh}}{R_{rd}} \left[\frac{rad}{s} \right] \quad (9)$$

$$d\omega_{rd} = \frac{dv_{veh}}{R_{rd}} \left[\frac{rad}{s^2} \right] \quad (10)$$

$$T_{rd} = F_{trac} \cdot R_{rd} \text{ [N} \cdot \text{m]} \quad (11)$$

Modelado de la transmisión mecánica

En este trabajo de investigación se utilizó un modelado matemático que representa una transmisión manual de cinco velocidades el cual tiene como entrada a ω_{rd} , $d\omega_{rd}$, T_{rd} e i . Como salida, calcula la velocidad angular en el volante $\omega_{trans} \left[\frac{rad}{s} \right]$, mostrada en la ecuación (12), la aceleración angular en el volante $d\omega_{trans} \left[\frac{rad}{s^2} \right]$, mostrada en la ecuación (13) y torque en el volante T_{trans} [N · m], el cual tiene dos eventualidades

dependiendo del flujo de potencia, es decir, en un caso puede la potencia fluir del motor a la rueda (aceleración), representada en la ecuación (15) y en el otro caso puede fluir de la rueda al motor (desaceleración), representada en la ecuación (16); donde RT_r es la relación de transmisión. Previo a la obtención de la ecuación (15) y ecuación (16), se analiza la ecuación (14) que es la relación de pérdida en cajas de cambios.

$$\omega_{trans} = \omega_{rd} \cdot RT_r \left[\frac{rad}{s} \right] \quad (12)$$

$$d\omega_{trans} = d\omega_{rd} \cdot RT_r \left[\frac{rad}{s^2} \right] \quad (13)$$

$$P_s = e \cdot P_e - P_o [W] \quad (14)$$

Donde $P_s [W]$, representa la potencia de salida, $P_e [W]$, representa la potencia de entrada, $P_o [W]$, representa la potencia de pérdida de velocidad de ralenti y e , representa la eficiencia de la transmisión.

$$T_{trans} = \frac{T_{rd} + \frac{P_o}{\omega_{rd}}}{RT_r \cdot e} [N \cdot m] \quad (15)$$

$$T_{trans} = \frac{e \cdot (T_{rd} - \frac{P_o}{e \cdot \omega_{rd}})}{RT_r} [N \cdot m] \quad (16)$$

La potencia en el volante $P_{trans} [W]$, mostrado en la ecuación (17), se obtiene al multiplicar la velocidad angular y torque en el volante:

$$P_{trans} = \omega_{trans} \cdot T_{trans} [W] \quad (17)$$

Modelado de motor de combustión interna y motor generador eléctrico

El enfoque de modelado del mapa estático es el más adecuado para simuladores de gestión de energía, el cual asume que el motor es un actuador perfecto, que responde inmediatamente a los comandos (Onori y otros, 2016). Como entrada a este bloque se tiene la ω_{trans} , $d\omega_{trans}$ y T_{trans} y como salida se tiene la potencia, que en el caso del *MCI* servirá para calcular el consumo de combustible y en el caso de *ME*, el signo de la potencia eléctrica, determina si está consumiendo o cargando la batería.

Motor de combustión interna.

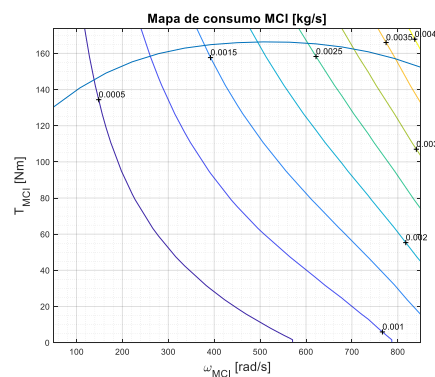
Basado en un mapa de consumo que está en función de la velocidad angular del *MCI* $\omega_{MCI} \left[\frac{rad}{s} \right]$ y del torque del *MCI* $T_{MCI} [N \cdot m]$, ecuación (18) y (19), respectivamente, donde $I_{MCI} [kg \cdot m^2]$ representa la inercia del *MCI*. El mapa de consumo como el que se muestra en la figura 6, indica el consumo de combustible $F_j \left[\frac{kg}{s} \right] f(\omega, T)$, que al ser multiplicado por el poder calorífico inferior de combustible $H_i \left[\frac{J}{kg} \right]$, se obtiene la potencia de consumo de combustible $P_{comb} [W]$ representada en la ecuación (20).

$$\omega_{MCI} = \omega_{trans} \left[\frac{rad}{s} \right] \quad (18)$$

$$T_{MCI} = T_{trans} + I_{MCI} \cdot d\omega_{trans} [N \cdot m] \quad (19)$$

$$P_{comb} = F_j \cdot H_i [W] \quad (20)$$

Figura 6. Mapa de consumo de combustible del motor (Guzzella).



La potencia de salida $P_{MCI} [W]$ que se tiene del bloque *MCI*, mostrada en la ecuación (21), considera la potencia debida a los accesorios del vehículo y cargas auxiliares ($P_{aux} [W]$), como la luz, aire acondicionado, equipos de infoentretenimiento, dirección asistida.

$$P_{MCI} = P_{comb} + P_{aux} [W] \quad (21)$$

Motor eléctrico

Basado en un mapa de eficiencia que está en función de la velocidad angular del *ME* $\omega_{ME} \left[\frac{rad}{s} \right]$ y del torque del *ME* $T_{ME} [N \cdot m]$, mostrados en la ecuación (22) y (23)

respectivamente, donde $I_{ME} [kg \cdot m^2]$ representa la inercia del ME . El mapa de eficiencia como el mostrado en la figura 7, indica la eficiencia del ME $e_{ME} f(\omega, T)$ que al ser multiplicada por ω_{ME} y T_{ME} ; se obtiene la potencia eléctrica neta del ME $P_{elc} [W]$ mostrada en la ecuación (24). La potencia de salida $P_{ME} [W]$ que tiene el bloque ME , mostrada en la ecuación (25), considera la potencia debida a los accesorios del vehículo y cargas auxiliares ($P_{aux} [W]$).

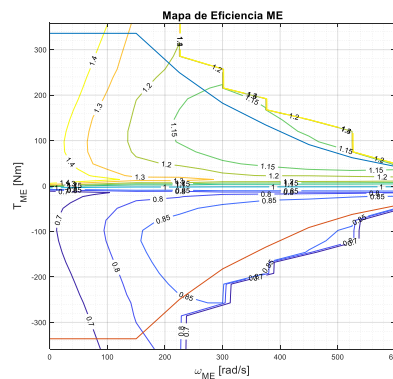
$$\omega_{ME} = \omega_{trans} \left[\frac{rad}{s} \right] \quad (22)$$

$$T_{ME} = T_{trans} + I_{ME} \cdot d\omega_{trans} [N \cdot m] \quad (23)$$

$$P_{elc} = \frac{1}{e_{ME}} \cdot \omega_{ME} \cdot T_{ME} [W] \quad (24)$$

$$P_{ME} = P_{elc} + P_{aux} [W] \quad (25)$$

Figura 7. Mapa de eficiencia de motores eléctricos (Guzzella).



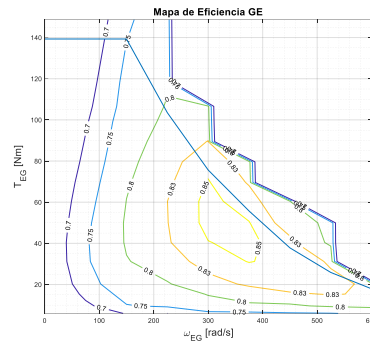
Generador eléctrico

Basado en un mapa de eficiencia que está en función de la velocidad angular del GE $\omega_{GE} \left[\frac{rad}{s} \right]$ y del torque del GE $T_{GE} [N \cdot m]$, mostrados en la ecuación (26) y (27) respectivamente. Al igual que para el ME , el mapa de eficiencia de la figura 8, indica la eficiencia del generador $e_{GE} f(\omega, T)$, en donde la potencia eléctrica total del GE $P_{GE} [W]$, que es también la potencia de salida del bloque de GE , se muestra en la ecuación (28).

$$\omega_{GE} = \omega_{trans} \left[\frac{rad}{s} \right] \quad (26)$$

$$T_{GE} = T_{trans} [N \cdot m] \quad (27)$$

$$P_{GE} = e_{GE} \cdot \omega_{GE} \cdot T_{GE} [W] \quad (28)$$

Figura 8. Mapa de eficiencia de generadores eléctricos (Guzzella).

Modelado de las fuentes de energía

Las dos fuentes de energía del *HEV* tratadas en este trabajo de investigación son el combustible que es un derivado fósil (gasolina) y baterías, basadas en tecnología Li-ion.

Tanque de combustible

Este bloque es el encargado de calcular el consumo de combustible CC $\left[\frac{\text{litros}}{100 \text{ km}}\right]$ para ello, como entrada se tiene la potencia P_{MCI} proveniente del bloque de *MCI* y la distancia total recorrida X_{TOT} proveniente del bloque ciclos de conducción. Con esta información, se calcula el flujo másico Fj_{comb} $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$, mostrado en la ecuación (29) para después integrarlo y obtener de esa manera la masa de combustible m_{comb} $[\text{kg}]$, mostrada en la ecuación (30), la cual, a su vez es dividida para la densidad de la gasolina (ρ_{comb} $\left[\frac{\text{kg}}{\text{litro}}\right]$) para obtener el volumen de combustible V_{comb} $[\text{litros}]$, representada en la ecuación (31), que, al ser dividido por X_{TOT} , se obtiene el consumo de combustible mostrado en la ecuación (32).

$$Fj_{comb} = \frac{P_{MCI}}{H_i} \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right] \quad (29)$$

$$m_{comb} = \int Fj_{comb} dt [\text{kg}] \quad (30)$$

$$V_{comb} = \frac{m_{comb}}{\rho_{comb}} [\text{litros}] \quad (31)$$

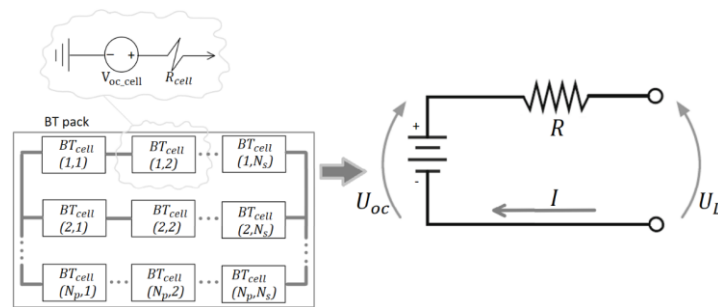
$$CC = \frac{V_{comb}}{X_{TOT}} \cdot 10^5 \left[\frac{\text{litros}}{100 \text{ km}}\right] \quad (32)$$

Baterías (BT)

El objetivo principal de este bloque es calcular el cambio de estado de carga de la *BT* (*SOC*) dada una carga eléctrica inicial, que es función de la capacidad de energía de la *BT* ($C_{p_{eng}}$ [Ah]). Para ello, en este trabajo de investigación se utilizó un modelo de circuito equivalente de batería de estado estacionario, mostrado en la figura 9, donde V_{oc_cell} [V], representa el voltaje de la celda, R_{cell} [ohm], representa la resistencia de la celda, BT_{cell} , representa una celda, BT_{pack} , representa el conjunto de celdas conectadas en serie denominadas cadenas y varias cadenas conectadas en paralelo, N_s , representa el número de celdas conectadas en serie y N_p , representa el número de cadenas conectadas en paralelo (Onori y otros, 2016).

A la derecha de la figura 9, está representado el circuito del paquete de baterías, donde, U_{oc} [V], representa el voltaje de circuito abierto ideal, mostrado en la ecuación (33), R [ohm], representa la resistencia del BT_{pack} , que es el factor que limita la capacidad de carga y descarga de una *BT*, mostrada en la ecuación (34), U_L [V] representa el voltaje en los terminales de BT_{pack} , I [A], representa la corriente del BT_{pack} , mostrada en la ecuación (35). Estas funciones, son no lineales y están en función del *SOC* de la BT_{pack} (Herrera Pérez, 2017).

Figura 9. Modelo de circuito de batería.



$$U_{oc}(SOC) = N_s \cdot V_{oc_cell} [V] \quad (33)$$

$$R(SOC) = \frac{N_s}{N_p} \cdot R_{cell} [ohm] \quad (34)$$

$$I = \frac{U_{oc}(SOC)}{2 \cdot R(SOC)} - \frac{\sqrt{U_{oc}^2(SOC) - 4 \cdot R(SOC) \cdot P_{batt} \cdot 10^3 \cdot \eta_{coul}^{-sgn(P_{batt})}}}{2 \cdot R(SOC)} [A] \quad (35)$$

P_{batt} [W], es la potencia de BT_{pack} , mostrada en la ecuación (36); en tanto que SOC se puede ver en la ecuación (37), donde Q_{nom} es la capacidad de carga nominal, y $Q(t)$ la cantidad de carga actualmente almacenada, η_{coul} , representa la eficiencia de carga.

$$P_{batt} = U_L \cdot I = U_{OC} \cdot I - R \cdot I^2 \text{ [W]} \quad (36)$$

$$SOC(t) = \frac{Q(t)}{Q_{nom}} \quad (37)$$

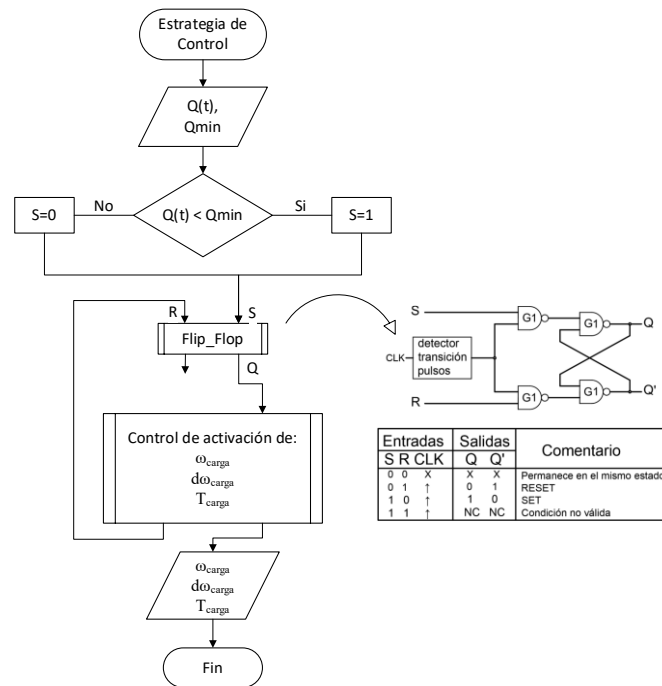
El peso del paquete de batería $mass_{batt}$ [kg], se puede determinar con la ecuación (38), donde V_{nom_cell} [V], representa el voltaje nominal de la celda de la batería, C_{nom_cell} [Ah], representa la capacidad de la celda de la batería, y ρ_{cell} $\left[\frac{Kg}{KWh}\right]$ es la densidad energética, la cual depende de la tecnología de celdas.

$$mass_{batt} = \frac{(V_{nom_cell} \cdot N_s) \cdot (C_{nom_cell} \cdot N_p)}{10^3} \cdot \rho_{cell} \text{ [kg]} \quad (38)$$

Estrategia de control

La estrategia de control utilizada en este trabajo de investigación está representada en el diagrama de flujo de la figura 10, la cual se basa en un *Flip – Flop SR*, que puede usarse para almacenar datos binarios debido a sus dos estados lógicos estables 0 y 1 (Zheng y otros, 2017). El *Flip – Flop SR* recibe la señal de *Set*, $S = 1$, cuando la cantidad de carga actualmente almacenada en la batería $Q(t)$ es menor que la carga mínima de la batería Q_{min} , caso contrario $S = 0$. La señal de salida $Q = 1$, hace que el control de activación ordene un ciclo de carga a la *BT*, al enviar una señal de funcionamiento predeterminado de velocidad de carga ω_{carga} , aceleración de carga $d\omega_{carga}$, y torque de carga T_{carga} al *MCI*, que a su vez está conectado, como se ve en la figura 1, en serie con el *GE*, devolviendo carga a la batería. Cuando $Q = 0$, el *MCI*, permanece apagado.

Figura 10. Flujograma de la estrategia de control.



Resultados

En este apartado se tiene dos cometidos, 1) es determinar un óptimo a la capacidad de energía de la batería Cp_{eng} y 2) es realizar un estudio de caso comparativo del consumo de combustible entre un vehículo de combustión interna (CI) versus un vehículo híbrido HEV con similares características físicas. Los parámetros de los vehículos en análisis se presentan en la tabla 1, mismos que se basan en las características que presentan los vehículos SUV.

Tabla 1. Parámetros del vehículo (km77, 2023).

Componente	Parámetro	Vehículo MCI	Vehículo HEV
Vehículo	Masa vehículo [Kg]	1565	1565
	Masa baterías [Kg] - Optimizado		76
	Sección transversal [m ²]	1,5	1,5
	Diámetro de rueda [m]	0,6884	0,6884
	Coefficiente de arrastre	0,3	0,3
	Coefficiente de fricción de rodadura	0,01	0,01
MCI	Desplazamiento [l]	1,987	1
	Velocidad del motor al ralentí [rad/s]	105	105

ME	Par máximo [Nm]	270
	Tensión nominal [V]	245
GE	Par máximo [Nm]	139
	Tensión nominal [V]	245

Para determinar el óptimo de Cp_{eng} , se utilizó un algoritmo genético con una función de costo (f_{costo}) que contiene el costo unitario de combustible ($CU_{comb} \left[\frac{USD}{litros} \right]$) y el costo unitario de la batería ($CU_{BT} \left[\frac{USD}{Ah} \right]$), la cual se presenta en la ecuación (39). El rango analizado fue entre $50 \leq Cp_{eng} \leq 200$, ya que se busca una hibridación alta. Se determinó un valor óptimo en cada uno de los tres ciclos de conducción mencionados anteriormente. Para ello, se puso como condición inicial un porcentaje de carga de *BT* del 25 %, con la finalidad de simular un escenario algo desfavorable del *HEV*. Los resultados se observan en la tabla 2, donde se destaca el valor de $Cp_{eng} = 96 [Ah]$ en el ciclo Europeo: NEDC.

$$f_{costo} = (CU_{comb})(V_{comb}) + (CU_{BT})(Cp_{eng}) \quad (39)$$

Tabla 2. Optimización de capacidad energética.

Ciclo de conducción	Rango de capacidad energética en análisis [Ah]	Capacidad energética óptima [Ah]	Peso de la BT [Kg]
Europeo "NEDC"		96	146
Japonés "10-15 MODE"	[50 - 200]	55	84
USA "FTP-HIGHWAY"		80	122

En el estudio de caso, se determinó el porcentaje de ahorro de combustible que representa un *HEV* frente a un vehículo *CI*. Para ello, al simular en un software, se obtuvo el consumo de combustible por cada uno de los tres ciclos de conducción. Primero con los parámetros de un vehículo *CI* y luego con los parámetros de un *HEV* en serie, con un valor de $Cp_{eng} = 96 [Ah]$ y variando el porcentaje inicial de carga de *BT* desde 25%, hasta 100%. Los resultados se muestran en la tabla 3, en donde los

valores presentados del *HEV*, son el promedio del rango de porcentaje de carga de *BT* analizado. Se observa que existe un ahorro del 37.9 % de combustible, en el ciclo de conducción Europeo: NEDC, con un aproximado del 8% superior al valor que mencionan algunos fabricantes de este tipo de vehículos como Hyundai, la cual indica que con un coche híbrido eléctrico se ahorra hasta un 30% en combustible y emisiones (zona eco by Hyundai, 2022). Por su parte, en el ciclo de conducción Japan: 10-15-Mode, el ahorro de combustible es del 75,9 %, esto se debe a que el tiempo de prueba es relativamente corto, de alrededor de 11[*min*], y el viaje en entornos urbanos favorece a los *HEV*, ya que la velocidad de ciclo no es muy alta y existen varios tramos de recorrido donde se aprovecha el frenado regenerativo, por lo que es mínimo el uso del *MCI* para recargar las baterías. Finalmente; en el ciclo de conducción USA: FTP-Highway, el *HEV* consume un 3,2 % más que el vehículo *CI*, teniendo sentido este resultado ya que en viajes en carretera los *HEV*, sobre todo con configuraciones en serie, no son eficientes, siendo en muchas situaciones, mejor para este propósito los vehículos *CI*.

Tabla 3. Comparativa de consumo de combustible.

Ciclo de conducción	Vehículo CI Consumo de combustible [litros/100 Km]	Vehículo CI Combustible total consumido [litros]	HEV Consumo de combustible [litros/100 Km]	HEV Combustible total consumido [litros]	Ahorro de combustible [%]
Europeo NEDC	8,241	0,784	5.160	0,491	37,9
Japonés 10-15 Mode	8,520	0,309	2,056	0.075	75,9
USA FTP-Highway	5,693	0,817	5,875	0,843	- 3,2

Las gráficas de la figura 11, 12 y 13, muestran el desempeño que tiene el vehículo *CI* y *HEV* en los diferentes ciclos de conducción simulados. La gráfica que presenta el consumo de combustible a lo largo del tiempo, muestra el instante en que el *MCI* del *HEV* entra en funcionamiento para cargar la *BT* y, hacia el final de cada uno de los ciclos de conducción, se observa la diferencia de consumo de combustible entre ambas tecnologías. Por otro lado, en la gráfica que presenta el estado de carga de la *BT*,

muestra varios escenarios de la capacidad de energía, donde valores de $Cp_{eng} = 96$ (óptimo), 100, 150, 200, presentan estabilidad en el funcionamiento del *HEV*, pero se observa que para un $Cp_{eng} = 50$, el estado de carga es muy irregular e inestable, por lo que, para los parámetros y condiciones de vehículo analizado en este estudio de la tabla 1, no es recomendable. En las gráficas que presentan el mapa de consumo de combustible, muestran el área donde opera el *MCI*, se puede observar que el *MCI* del *HEV*, funciona de una manera óptima, esto se logra al implementar, en el bloque de estrategia de control, la velocidad angular a la que ha de funcionar el *MCI* del *HEV* para que por medio del *MG*, se devuelve energía a la *BT*.

Figura 11. Desempeño de vehículos *CI* y *HEV* en ciclo *Europe: NEDC*.

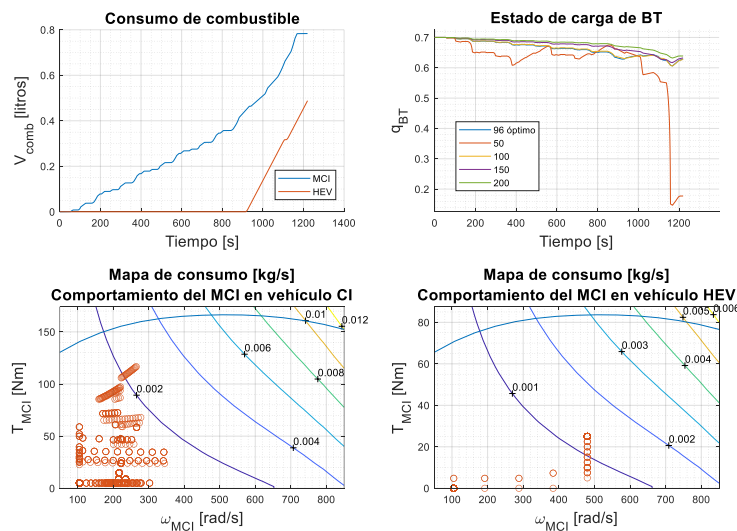


Figura 12. Desempeño de vehículos *CI* y *HEV* en ciclo *Japan: 10-15-Mode*.

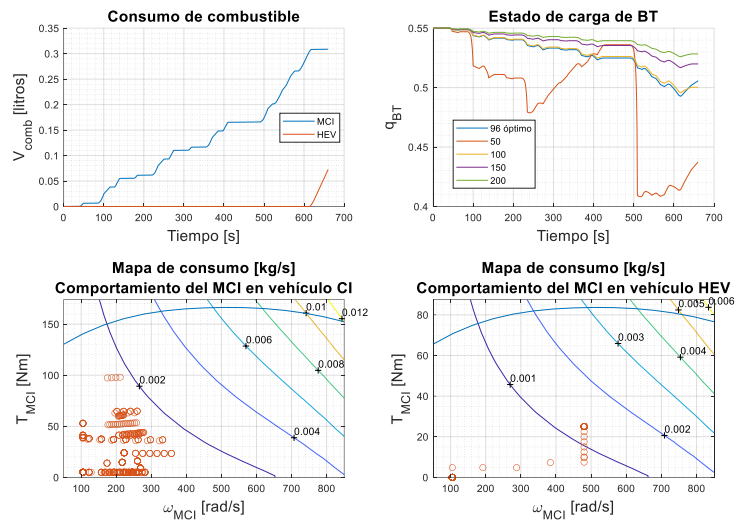
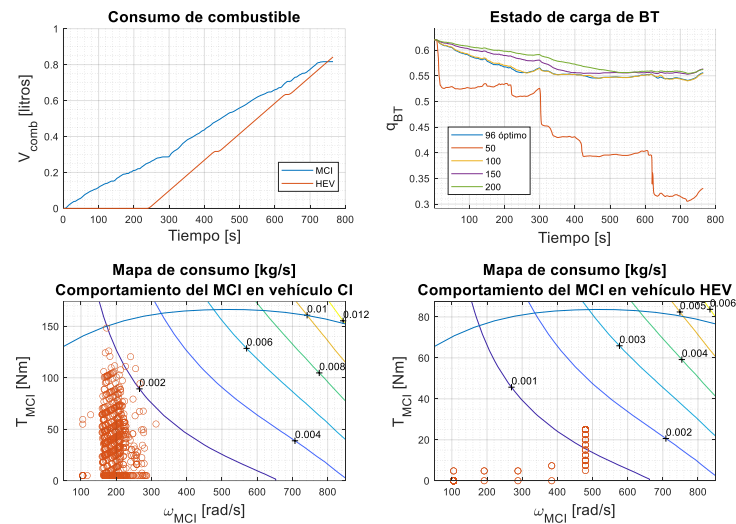


Figura 13. Desempeño de vehículos CI y HEV en ciclo USA: FTP-Highway.



Conclusiones

Este trabajo presenta los modelos matemáticos que intervienen en la dinámica de un HEV. Después, desde un enfoque backward, con un algoritmo genético y una estrategia de control *Flip – Flop SR*, se analizó en busca de un óptimo para Cp_{eng} en tres diferentes ciclos de conducción. Finalmente se realizó un estudio comparativo de consumo de combustible entre un vehículo CI y un HEV.

El óptimo de $Cp_{eng} = 96$ de la BT, es el valor más alto de entre los tres ciclos de conducción analizados bajo condiciones iniciales de carga de batería del 25 %. De las

figuras 11, 12 y 13, en la gráfica de estado de carga de *BT*, se observa que existe estabilidad y tiene un desempeño aceptable.

El comparativo del consumo de combustible entre ambas tecnologías, muestra que el *HEV*, consume menos combustible en entornos de tráfico densos, generalmente urbanos. En cambio, en viajes donde la velocidad del auto es más continua, generalmente en entornos rurales, el *HEV* puede llegar a consumir más combustible que su homónimo de *CI*, como se muestra en la tabla 3. En general de los tres ciclos de conducción y con los parámetros de vehículos analizados, en promedio el *HEV* consume un 36,8 % menos que un *CI*, lo que hace que esta tecnología sea muy interesante y aporte en la disminución de CO_2 y otros gases contaminantes de la naturaleza.

Futuros trabajos relacionados deberían abordar configuraciones de *HEV* en paralelo y multimodo, para compararlas entre todas con el propósito de encontrar modos de funcionamiento óptimos en los diferentes escenarios de densidades de tráfico. Además, se pudieron determinar óptimos de algunos componentes del *HEV*, como el desplazamiento del motor (cilindrada), pesos y espacio máximos admisibles para la ubicación de la *BT*. Finalmente, se puede realizar la gestión de fuentes de energía con estrategias numéricas y analíticas para encontrar mejores reglas implementables a *HEV*.

Referencias

- Anselma, P. G., Huo, Y., Roeleveld, J., Belingardi, G., & Emadi, A. (2019). Integration of On-line Control in Optimal Design of Multimode Power-split Hybrid Electric Vehicle Powertrains. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(4), 3436-3445. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2901901>
- Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador (AEADE). (2021). *Anuario 2021*. Obtenido de Anuarios : <https://www.aeade.net/anuario/>
- Chen, B., Pan, X., & Evangelou, S. A. (2022). Optimal Energy Management of Series Hybrid Electric Vehicles With Engine Start–Stop System. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1-16. <https://doi.org/10.1109/TCST.2022.3192920>

- Diariomotor. (01 de Febrero de 2021). *Diariomotor*. Obtenido de Diariomotor Web site: https://www.youtube.com/watch?v=XXzLTQTeLYg&t=1s&ab_channel=Diariomotor
- Guan, J. C., & Chen, B. C. (2019). Adaptive Power Management Strategy Based on Equivalent Fuel Consumption Minimization Strategy for a Mild Hybrid Electric Vehicle. *Conferencia de propulsión y potencia de vehículos IEEE de 2019 (VPPC)*. <https://doi.org/10.1109/VPPC46532.2019.8952289>
- Guzzella, L. (s.f.). *Caja de herramientas QuasiStaatc Simulation Toolbox*.
- Herrera Pérez, V. I. (2017). *Optimized energy management strategies and sizing of hybrid storage systems for transport applications*.
- km77. (03 de 02 de 2023). *Comparativa de precios, datos técnicos y equipamientos: km77*. Obtenido de km77 Web Site: <https://www.km77.com/comparador/ve:car:toyota:rav4:2016:5-puertas:advance:rav4-20-valvematic-awd,ve:car:toyota:rav4:2016:5-puertas:feel:rav4-hybrid-awd-feel#measurements>
- Lee, H., Park, Y.-i., & Cha, S. W. (2015). Power Management Strategy of Hybrid Electric Vehicle using Power Split Ratio Line Control Strategy based on Dynamic Programming. *IEEE*, 1739-1742. <https://doi.org/10.1109/ICCAS.2015.7364645>
- Lifeder Education . (28 de Enero de 2022). *Lifeder Education*. Obtenido de Lifeder Education Web Site: https://www.youtube.com/watch?v=TdLUgNXQ-NI&ab_channel=LifederEducaci%C3%B3n
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (03 de Junio de 2022). *National Oceanic and Atmospheric Administration*. Obtenido de National Oceanic and Atmospheric Administration Web site: <https://www.noaa.gov/news-release/carbon-dioxide-now-more-than-50-higher-than-pre-industrial-levels>
- Onori, S., Serrano, L., & Rizzoni, G. (2016). *Hybrid Electric Vehicles Energy Management Strategies*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6781-5>
- Parlamento Europeo. (22 de Marzo de 2019). *Noticias Parlamento Europeo*. Obtenido de Noticias Parlamento Europeo Web site: <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20190313STO31218/emisiones-de-co2-de-los-coches-hechos-y-cifras-infografia>

- Rios Bedoya, V., Marquet, O., & Miralles-Guasch, C. (2016). Estimación de las emisiones de CO₂ desde la perspectiva de la demanda de transporte en Medellín. *Revista Transporte y Territorio*, 302-322.
- Tang, L., Rizzoni, G., & Onori, S. (2015). Energy Management Strategy for HEVs Including Battery Life Optimization. *IEEE TRANSACTIONS ON TRANSPORTATION ELECTRIFICATION*, 1(3), 211-222.
<https://doi.org/10.1109/TTE.2015.2471180>
- United Nations . (03 de 06 de 2022). *Climate Change: El acuerdo de París*. Obtenido de El acuerdo de París: <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-paris-agreement/el-acuerdo-de-paris>
- Zheng, J., Zeng, Z., & Zhu, Y. (2017). Memristor-based Nonvolatile Synchronous Flip-Flop Circuits. *2017 Seventh International Conference on Information Science and Technology (ICIST)*(16881162), 504-508.
<https://doi.org/10.1109/ICIST.2017.7926812>
- zonaeco by Hyundai. (23 de 12 de 2022). *zonaeco by Hyundai*. Obtenido de zonaeco by Hyundai Web site: <https://www.hyundai.com/es/zonaeco/eco-life/en-ruta/consumo-coche-hibrido>