

Análisis comparativo del consumo de combustible y las emisiones entre vehículos eléctricos híbridos y convencionales: una perspectiva basada en los niveles de hibridación

Juan C. Castillo¹, Andrés Uribe², Manuela Idárraga³, Michael Giraldo⁴, Juan E. Tibaquirá⁵ Sebastián Ospina⁶

¹Área de Industria, Materiales y Energía, Escuela de Ciencias Aplicadas e Ingeniería, Universidad EAFIT, Colombia.
Email: jccastillo@eafit.edu.co

²Grupo de investigación en Gestión Energética, Mecánica Aplicada, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.
Email: anfeuribe@utp.edu.co

³Grupo de investigación en Gestión Energética, Mecánica Aplicada, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.
Email: m.idarraga@utp.edu.co

⁴Área de Industria, Materiales y Energía, Escuela de Ciencias Aplicadas e Ingeniería, Universidad EAFIT, Colombia.
Email: mgiral36@eafit.edu.co

⁵Grupo de investigación en Gestión Energética, Mecánica Aplicada, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.
Email: juantiba@utp.edu.co

⁶Grupo de investigación en Gestión Energética, Mecánica Aplicada, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.
Email: sebaospina@utp.edu.co

Resumen

Este estudio realiza una comparación energética y de emisiones contaminantes de diferentes niveles de hibridación de vehículos eléctricos: híbridos ligeros (MHEV), híbridos completos (HEV) e híbridos enchufables (PHEV), con respecto a los vehículos convencionales. Para ello, se construyó una base de datos con información de vehículos eléctricos híbridos registrados en Colombia desde el año 2017 al año 2022, con valores de consumo de combustible y emisiones reportados por los fabricantes durante el proceso de homologación. Durante el proceso, se complementó la información empleando valores del etiquetado energético y se aplicaron factores de conversión para realizar la comparación bajo un mismo ciclo de conducción. Finalmente, se agruparon los vehículos eléctricos híbridos por su nivel de hibridación. El análisis permitió identificar que el parque automotor se ve beneficiado por la incorporación de vehículos HEV y PHEV, pero los vehículos MHEV no representan una mejora significativa.

Palabras clave: vehículos eléctricos híbridos, factores de emisión, consumo de combustible.

Abstract

This study makes an energy and pollutant emissions comparison of different levels of hybridization of electric vehicles; Light Hybrids (MHEV), Full hybrids (HEV) and Plug-in Hybrids (PHEV), with respect to conventional vehicles. To this end, a database was built with information on hybrid electric vehicles registered in Colombia from 2017 to 2022, with fuel consumption and emissions values reported by manufacturers during the homologation process. During the process, the information was complemented using values from the energy labelling and conversion factors were applied to make the comparison under the same driving cycle. Finally, hybrid electric vehicles were grouped by their level of hybridization. The analysis identified that the vehicle fleet benefits from the addition of HEVs and PHEVs, but MHEVs do not represent a significant improvement.

Keywords: hybrid electric vehicles, emission factors, fuel consumption.

1. Introducción

Los vehículos eléctricos híbridos han experimentado un crecimiento significativo en el mercado automotor a nivel global [1]. Este auge, puede tener relación con los diferentes incentivos de los gobiernos a este mercado. Dichos incentivos pueden darse a fabricantes, comercializadores y consumidores. Existen incentivos de tipo económico como reducciones arancelarias y/o

tributarias. También existen medidas no económicas como la excepción de restricciones de movilidad y zonas de parqueo preferente, entre otros [2].

En América Latina, algunos países como México eximen el pago del impuesto anual durante los primeros cinco años y otorgan un descuento del 50% en los cinco años siguientes [3]. En Chile, los vehículos híbridos enchufables (PHEV) vendidos desde 2021

reciben beneficios graduales en el impuesto al permiso de circulación, basados en la antigüedad del vehículo [4]. En Colombia, el panorama no es diferente, se estableció un arancel de importación del 5%, para un número máximo de 3000 vehículos por año, en comparación con el arancel habitual del 35%, y se ofrece un descuento del 40% en el impuesto automotor durante los primeros cinco años posteriores a la matrícula del vehículo [5]. Adicionalmente, 30% de descuento en revisión técnico-mecánica y 10% en el seguro obligatorio de accidentes de tránsito y en ciudades como Bogotá, Medellín y Pereira, se realiza la excepción de la restricción vehicular [6].

Estos incentivos han sido adjudicados, debido a la actual preocupación de los países por alcanzar las metas establecidas en las Contribuciones Determinadas a nivel Nacional (NDECs) en el marco del Acuerdo de París, y considerando que el sector transporte consume cerca del 60% de los combustibles fósiles, además de ser uno de los sectores más ineficientes en términos energéticos [7]. Sin embargo, los vehículos eléctricos híbridos son una tecnología relativamente nueva que acaba de incorporarse en el parque automotor, incluso en Estados Unidos, se tiene disponibilidad de datos concisos sólo desde el año 2011 [8]. Además, se han registrado diferentes niveles de hibridación: híbridos ligeros (MHEV), Híbridos Completos (HEV) e Híbridos Enchufables (PHEV). Donde algunos vehículos se consideran híbridos por contar con baterías y frenos regenerativos, lo cual influye directamente en una escasa reducción del consumo de energía. En este sentido, actualmente surge la incertidumbre sobre si la integración de los vehículos híbridos en la flota de vehículos de Colombia realmente contribuye a la reducción del consumo de energía y las emisiones contaminantes.

Algunos investigadores, han analizado el comportamiento de las emisiones generadas por estos vehículos realizando pruebas de ruta. Por ejemplo, Karjalainen et. al, llevaron a cabo pruebas en ruta para comparar las emisiones de un vehículo eléctrico híbrido enchufable con dos vehículos convencionales, encontrando que los vehículos híbridos enchufables presentan un factor de emisión de material particulado cerca de diez veces menor que el registrado por los

vehículos convencionales [9]. Wang et. al, realizaron pruebas en ruta con un vehículo híbrido enchufable, donde evidenciaron que el consumo de energía varía según su operación. Cuando el vehículo se dispone a realizar sostenimiento de carga de baterías enciende el motor de combustión interna, lo cual aumenta su consumo en un 45% respecto al uso de la carga de la batería [10]. Por su parte, Huang et. al, llevaron a cabo pruebas de ruta en un vehículo eléctrico híbrido completo y en un vehículo convencional de características similares, con lo cual fue posible identificar que el vehículo eléctrico híbrido presentó un rendimiento de combustible 41% mayor que el presentado por el vehículo convencional, mientras las emisiones de CO₂ y NO_x se redujeron un 33% y 61% respectivamente [11].

La revisión bibliográfica realizada, evidencia que la mayoría de los estudios se centran en el análisis de PHEV, y los resultados se enfocan en vehículos específicos que no permiten generalizar las emisiones presentadas por una flota de vehículos. En este sentido, este artículo, compara el consumo energético y las de gases de efecto invernadero y contaminantes de diferentes niveles de hibridación de vehículos: MHEV, HEV y PHEV, frente a los vehículos convencionales, considerando la flota de vehículos de Colombia. Lo anterior permite identificar su influencia en las metas de reducción de consumo y emisiones, tomando como base los vehículos convencionales. Con este análisis se podrán proyectar lineamientos técnicos que permiten priorizar beneficios, para aquellos vehículos que realmente presenten impactos energéticos y ambientales positivos.

2. Métodos

La metodología empleada se basa en el análisis de datos de información de emisión por kilómetro y rendimiento de combustible, donde se trabajan dos bases de datos. La primera consolida la información de históricos de vehículos a combustión interna, eléctricos e híbridos entre el año 2017 y 2022. La segunda contiene información sobre emisiones y rendimiento, registrada por importadores en el mismo periodo de análisis. En la Figura 1, se presenta la metodología empleada para obtener el consumo de energía y las

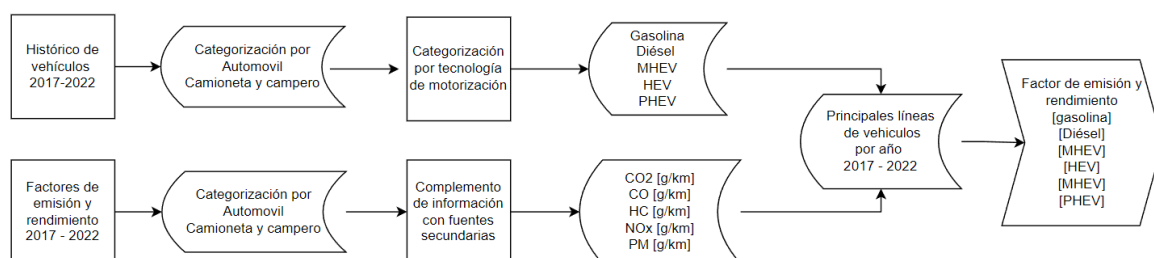


Figura 1. Metodología empleada para el análisis de las emisiones.

emisiones de las tecnologías de motorización objeto de estudio.

En este sentido, el análisis propuesto para los vehículos eléctricos híbridos del parque automotor del país considera lo siguiente:

1. Seguimiento a la información de rendimiento de combustible por año. En la cual, se busca identificar posibles mejoras tecnológicas en los vehículos híbridos que ingresan al mercado.
2. Comparación en emisiones por kilómetro y rendimiento de combustible, considerando nivel de hibridación con respecto a los vehículos convencionales. Para ello, se emplea el promedio ponderado de emisiones y rendimiento de combustible teniendo en cuenta la cantidad de vehículos.
3. Cálculo de emisiones totales y consumo de energía para vehículos híbridos y convencionales para el panorama actual. En este se emplean dos escenarios de comparación: el primero en el que los vehículos híbridos no hubieran ingresado al país, y el segundo en el que sólo los MHEV no hubieran ingresado al país. De esta manera, identificar la influencia de los vehículos híbridos para reducir las emisiones del parque automotor.

A continuación se presenta el procesamiento de la información de las bases de datos mencionadas.

2.1.1. Vehículos eléctricos híbridos

El primer análisis dio paso a identificar que el 96% de los vehículos eléctricos híbridos están representados por 37 líneas registradas en el RUNT, las cuales se encuentran en las categorías: Automóvil, camioneta y campero, los cuales presentan motor de combustión de encendido por chispa (gasolina). Por lo tanto, el análisis se realizó para estas categorías con vehículo a gasolina.

El parque automotor en Colombia hasta el año 2022 contaba con alrededor de 5 130 000 vehículos convencionales en las categorías automóviles, camionetas y camperos, mientras que los vehículos híbridos ascendían a 46 500. Lo cual representa 0.9% del total de la flota. Visto desde otro panorama, entre el año 2017 y 2022 cerca de 906 538 vehículos convencionales ingresaron al país, lo cual significa que la cantidad de vehículos híbridos respecto a los convencionales en cuanto a ingresos es del 5.1%.

Para identificar los vehículos híbridos representativos en el país durante el periodo de análisis, se clasificó la información por marca y línea, haciendo énfasis en la cantidad de vehículos registrados por año. Durante el análisis de la información, tanto para vehículos

híbridos como para convencionales, no fue posible considerar algunas líneas de vehículos que hacen parte de los representativos en el país, puesto que, la información requerida no se encontraba disponible en las bases de datos. Por ejemplo, para el año 2022, no fue posible analizar el vehículo Suzuki Swift (MHEV). Estos vehículos fueron reemplazados con las líneas siguientes en la lista de vehículos.

Por otro lado, los vehículos híbridos se clasificaron en MHEV, HEV y PHEV. Donde, para ser específicos los MHEV, son aquellos que no cuentan con un motor eléctrico que tenga la capacidad de mover el vehículo por sí sólo. En la Tabla 1, se presentan algunas de las marcas y líneas representativas para cada nivel de hibridación por año de análisis en Colombia, identificando su porcentaje de participación respecto al total de vehículos híbridos en cada año de análisis.

Tabla 1. Vehículos híbridos eléctricos representativos para Colombia.

Tecnología	Marca	Línea	Porcentaje
Año 2017			
MHEV	BMW	X5	63%
HEV	HYUNDAI	Ioniq	3%
PHEV	BMW	I8	3%
Año 2018			
MHEV	BMW	X5	25%
HEV	KIA	Optima	1%
PHEV	BMW	330E	51%
Año 2019			
MHEV	AUDI	Q8	15%
HEV	KIA	Niro	36%
PHEV	MERCEDES BENZ	GLC 350 E 4MATIC	8%
Año 2020			
MHEV	MERCEDES BENZ	GLE 450 4MATIC	9%
HEV	TOYOTA	Corolla	41%
PHEV	BMW	330E	3%
Año 2021			
MHEV	SUBARU	Forester	6%
HEV	TOYOTA	RAV 4	27%
PHEV	MERCEDES BENZ	GLC 300 E 4MATIC	2%
Año 2022			
MHEV	MERCEDES BENZ	GLE 450	5%
HEV	TOYOTA	Corolla Cross	20%
PHEV	MERCEDES BENZ	GLC 300 E 4MATIC	4%

Así mismo, para los vehículos convencionales a gasolina se realizó un análisis de Pareto, donde se logró identificar las marcas y líneas más representativas del parque automotor en el periodo de tiempo analizado para las categorías automóvil, camioneta y campero, algunas de ellas se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Vehículos convencionales representativos en Colombia.

Marca	Línea	Cantidad
RENAULT	Sandero	26 649
MAZDA	3	24 171
RENAULT	Stepway	21 464
NISSAN	March	19 883
CHEVROLET	Onix	19 544
KIA	Picanto	16 392
MAZDA	2	13 514
NISSAN	Versa	12 107

2.1.2. Emisiones y rendimiento de combustible

Para determinar los valores de emisión por kilómetro de dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x) y material particulado (PM), y de rendimiento de combustible (Rc) asociados a cada línea vehicular, se empleó la base de datos donde se registran los valores reportados por los fabricantes durante el proceso de homologación. Para el análisis se empleó la información reportada en el ciclo *New European Driving Cycle* (NEDC), ya que el 95% de las líneas seleccionadas para el análisis se encuentran registradas en este ciclo.

Para complementar alguna información no disponible en cuanto a rendimiento de combustible en el ciclo deseado, se empleó información del etiquetado energético de Chile [12]. De igual manera, para la información reportada en otros ciclos de conducción, se procedió a identificar una herramienta para convertir los valores de rendimiento de combustible a un valor equivalente en NEDC. Para ello, se empleó la calculadora desarrollada por *The International Council on Clean Transportation* (ICCT) en el año 2014 [13]. La ecuación (1), gobierna la conversión en el consumo de combustible:

$$C_2 = (a_1 DS + a_2) C_1 + d_1 DS + d_2 \quad (1)$$

Donde, a_1 y a_2 son constantes, DS es la cantidad de vehículos del análisis, C_1 son las emisiones de CO₂/km del ciclo desde el cual desea realizar la conversión y, d_1 y d_2 son los valores de ajuste planteados en el modelo, tal como se observa en la Tabla 3.

Tabla 3. Valores para conversión para ciclo NEDC.

C ₂	C ₁	a ₁	a ₂	d ₁	d ₂
NEDC	CAFE	0.088	1.1325	-7.840	-13.739
NEDC	JC08	-0.0227	0.8457	-2.891	24.840
NEDC	WLTC	0.0486	1.0475	5.037	-22.727

Así mismo, para la información requerida en términos de emisiones, se empleó la plataforma VITAL del Ministerio de Ambiente, en la cual se encuentran los

registros de los Certificados de Emisiones por Pruebas Dinámicas (CEPD). Así mismo, los valores fueron complementados y comparados con información reportada en artículos científicos [9], [10], [11], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22].

2.1.3. Consolidación de información

La información de los históricos no contenía la información del nivel de hibridación. Sin embargo, la base de datos de los fabricantes si proporcionaba dicha información. En este sentido, para el análisis la información se consolidó en una base de datos, haciendo relación de variables. Además, el nivel de hibridación se corroboró haciendo uso de la Asociación Nacional de Movilidad Sostenible (ANDEMOS) y de bibliografía gris como revistas de vehículos vendidos.

Lo anterior, dio paso a compilar la información requerida para el análisis. En la Tabla 4 se presenta el promedio ponderado de las emisiones por kilómetro y del rendimiento de combustible para las tecnologías de motorización en el periodo de tiempo analizado.

Tabla 4. Información de emisiones y rendimiento de combustible, empleada para el análisis en el año 2022.

Tec. Motor	Rc	CO ₂	CO	NO _x	PM
	[km/gal]	[g/km]	[mg/km]		
MHEV	43	204	350	24	0.29
HEV	80	100	258	21	0.39
PHEV	165	55	144	18	0.35
Convencionales	41	122	385	24	0.3

Así, se emplea la ecuación (2) y la ecuación (3), con el fin de calcular la cantidad de toneladas emitidas por año [Ton/año] y el consumo energético por año [TJ/año] para los vehículos que ingresaron.

$$CE = \frac{VKT * PCI * \rho}{Rc} \quad (2)$$

$$E = FE_i * VKT \quad (3)$$

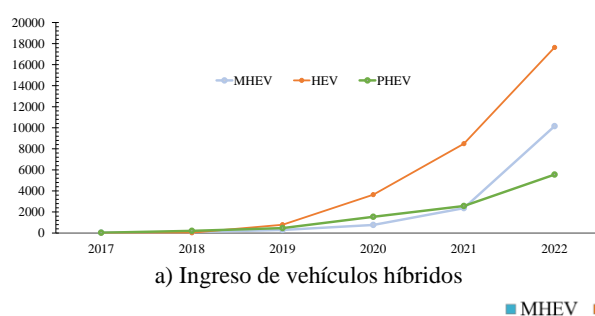
Donde, VKT [km] es la cantidad de kilómetros recorridos al año por las categorías de vehículos bajo análisis, PCI el poder calorífico inferior del combustible [kJ/kg], ρ la densidad del combustible [kg/m³], Rc el rendimiento de combustible [km/L] y FE son las emisiones por kilómetro para cada producto k.

3. Resultados

La información de cantidad de vehículos históricos permitió identificar el crecimiento exponencial de los diferentes niveles de hibridación durante los años de análisis. La cantidad de líneas de vehículos ofertadas

en el mercado automotor ha permitido que los compradores, tengan una variedad de opciones.

Como se observa en la Figura 2 a), los vehículos más vendidos son los vehículos híbridos completos (HEV), seguido de los MHEV. Sin embargo, es importante resaltar que en Colombia aún se desconoce cuál de las estrategias de gobierno ha influido con mayor fuerza en la inclinación de los compradores hacia los diferentes niveles de hibridación, lo cual es una tarea importante para la comunidad científica del país y para los tomadores de decisión.



basarse en el nivel de hibridación de los vehículos que ingresan para otorgar un beneficio, sino también en el rendimiento o la eficiencia energética que ostentan dichos vehículos.

La comparación de los vehículos inicia con el análisis del rendimiento de combustible y emisiones de CO₂ para las tres tipologías de hibridación y los vehículos convencionales. En la Figura 3, se puede observar que los vehículos eléctricos híbridos HEV y PHEV presentan aproximadamente entre un 95% y 300% mejor rendimiento de combustible que los vehículos

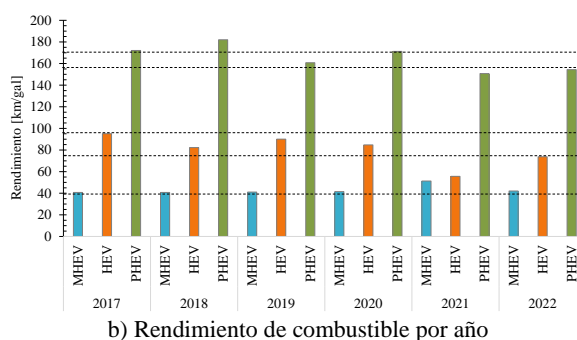


Figura 2. Ingreso y rendimiento de los vehículos eléctricos híbridos en el periodo de análisis.

Por otro lado, en la Figura 2 b), se observa que a pesar de que nuevas tecnologías de vehículos han ingresado al país, en promedio estas no presentan mejoras considerables en el rendimiento de combustible. El comportamiento no presenta una tendencia clara, inclusive se puede observar que para el año 2022 los vehículos HEV y PHEV redujeron el rendimiento de combustible en un 22% y 10% respectivamente, en comparación con los que ingresaron en el año 2017, mientras que, para vehículos MHEV el rendimiento de combustible se muestra constante en el tiempo.

En este sentido, es importante resaltar que los tomadores de decisión en el país no sólo deberán

convencionales que operan con motores de encendido por chispa (gasolina), por lo anterior, los vehículos eléctricos híbridos de estas dos tecnologías presentan menores emisiones de CO₂.

Adicionalmente, al comparar entre los niveles de hibridación, se evidencia que los vehículos MHEV emiten cerca de 73% más CO₂ que los vehículos PHEV. Esto se debe a que en los MHEV el motor eléctrico no cuenta con la capacidad suficiente para mover el vehículo, por lo que, el recorrido se realiza mayormente con el motor de combustión interna.

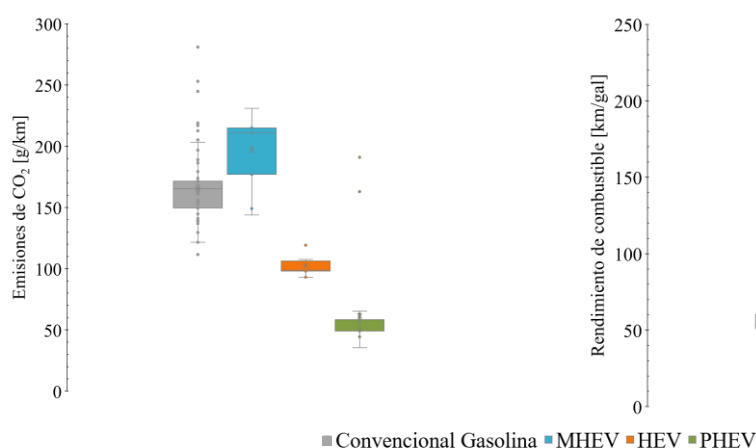


Figura 3. Comparación de emisiones de CO₂ por kilómetro y rendimiento de combustible.

Por su parte, los HEV y los PHEV presentan un mayor rendimiento y menores emisiones de CO_2 dado que durante la operación los motores intercalan su trabajo dependiendo la demanda de potencia, lo cual permite que en algunos modos de operación el vehículo se desplace solo con el motor eléctrico [23].

Por otro lado, de la Figura 4, se puede evidenciar que los vehículos eléctricos híbridos no presentan un cambio significativo en las emisiones de NO_x con respecto a los vehículos convencionales de encendido por chispa. Mientras que en las emisiones de CO los vehículos eléctricos híbridos presentan reducciones entre 9% y 62% con respecto a la media de los convencionales con motor de combustión interna. Sin embargo, los vehículos eléctricos híbridos con tecnología HEV y PHEV presentan emisiones de PM por kilómetro entre un 21% y 37% mayor que los vehículos eléctricos híbridos con tecnología MHEV.

Lo anterior, se debe a que los HEV y PHEV pueden presentar aumento en el número de partículas emitidas por los arranques en frío del motor de combustión interna [11]. Finalmente, con la finalidad de comparar directamente las emisiones y el consumo de energía de los vehículos híbridos respecto a los convencionales, se consideró la cantidad de vehículos que ingresaron al país en periodo de análisis.

De esta manera evitar la falta de información de valores de emisión por kilómetro y rendimiento de combustible de los vehículos de años anteriores. En este sentido, se emplearon los valores de emisión promedio para cada tecnología de motorización y asumiendo un recorrido promedio anual de 14 000 km para las categorías automóvil, camioneta y campero en el país, se logró identificar la cantidad de emisiones en toneladas y el consumo de energía. En este sentido, la Tabla 5 presenta las emisiones emitidas al año, por los vehículos que ingresaron entre el 2017 y 2022 para cada tecnología de motorización, el cual se nombra Escenario base.

Tabla 5. Cantidad de emisiones y consumo de energía de los vehículos que ingresaron entre 2017 y 2022.

Tec. Motor	CO ₂	CO	NO _x	PM	Energía
	[Ton/año]				[TJ/año]
MHEV	46 512	80	5.6	0	639
HEV	34 800	89	7.2	0	517
PHEV	4 739	12	1.6	0	63
Convencionales	1 570 099	4 955	1.7	22	37 639
Total (base)	1 656 150	5 137	1 764	22	38 857

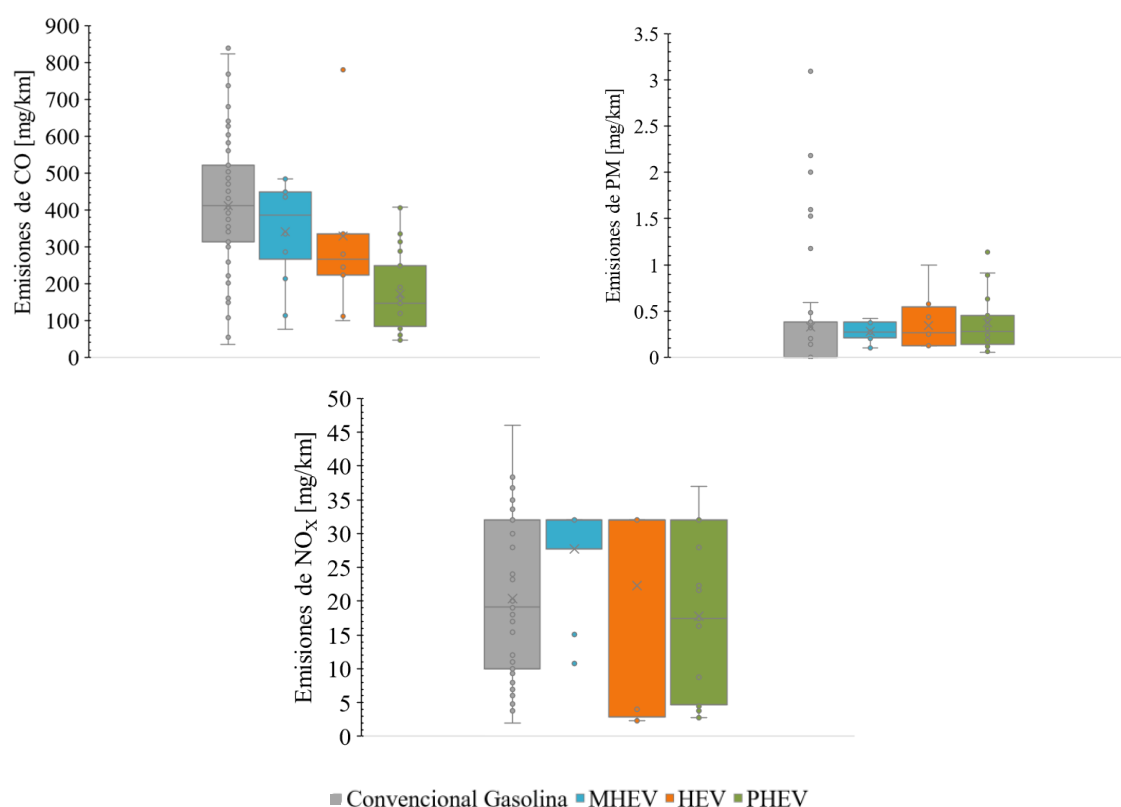


Figura 4. Comparación de emisiones de CO, PM y NO_x.

Como se puede observar, las emisiones de la flota de vehículos convencionales siguen siendo mayores que la de las otras tecnologías, algo obvio debido a la cantidad de vehículos. Sin embargo, es la base que permite identificar lo que pasaría si no hubieran ingresado vehículos híbridos al país (Escenario 1), o si sólo se hubiera restringido el ingreso para vehículos MHEV, dejando los HEV y PHEV con los beneficios actuales (Escenario 2).

Para el Escenario 1, se realizó la suposición de que al no existir vehículos eléctricos híbridos la cantidad de vehículos los compradores no tendrían otra opción que continuar con la adquisición de vehículos convencionales, por lo tanto, se suman dichos vehículos a los convencionales.

Así entonces, en la Tabla 6 se presentan los resultados obtenidos y la diferencia entre el Escenario 1 y el Escenario base.

Tabla 6. Cantidad de emisiones y consumo de energía sin vehículos eléctricos híbridos.

Tec. Motor	CO2	CO	NOx	PM	Energía
	[Ton/año]				[TJ/año]
Total (sin híbridos)	1 650 733	5 209	325	4	39 572
Diferencia con Escenario Base	-5417	73	-1 439	-18	714

Los resultados obtenidos para el Escenario 1, comparados con el Escenario base, muestran que el parque automotor sin vehículos híbridos dejaría de emitir cerca de 5417 toneladas de CO₂, 1439 toneladas de NOx y 18 Toneladas de PM. Sin embargo, aumentan sus emisiones de CO en 73 Toneladas y el consumo de energía en 714 TJ.

Por otro lado, para el Escenario 2 donde se hace énfasis en los vehículos MHEV, se asume que los compradores se inclinarían a la compra sólo de vehículos convencionales, por lo tanto, la cantidad de vehículos actual en el nivel MHEV pasa a sumarse a la flota de

vehículos convencionales, mientras que las otras tecnologías conservan sus cantidades. La Tabla 7 presenta los resultados obtenidos y la diferencia entre el Escenario 2 y el Escenario base.

Tabla 7. Cantidad de emisiones y consumo de energía sin vehículos MHEV.

Tec. Motor	CO2	CO	NOx	PM	Energía
	[Ton/año]				[TJ/año]
Total (sin MHEV)	1 637 512	5145	323	4	38 887
Diferencia con Escenario base	-18 637	8	-1 440	-18	30

Los resultados presentan que el parque automotor sin vehículos MHEV dejaría de emitir cerca de 18637 toneladas de CO₂. Así mismo, se dejarían de emitir 1440 y 18 toneladas de NOx y PM respectivamente. Sin embargo, aumentan sus emisiones de CO en 8 Toneladas. Además, se presenta un hecho importante puesto que, sólo aumentan 30 TJ de energía consumida.

La Figura 5, describe el comportamiento en cuanto a la energía consumida en los escenarios planteados y se observa la comparación en cuanto a la cantidad de toneladas de CO₂ por año de los vehículos analizados. Se puede evidenciar que la flota de vehículos híbridos actual no presenta una mejora en la reducción de emisiones de CO₂.

4. Conclusiones

Los vehículos eléctricos híbridos en el país tienen un crecimiento exponencial en el parque automotor, esto se debe a los diferentes beneficios tanto monetarios como no monetarios que los compradores tienen al adquirirlos. Si este comportamiento continúa, los vehículos convencionales serán remplazados prontamente por estas tecnologías, lo cual a grandes rasgos es beneficioso para el país en el sentido de cumplir las NDCs.

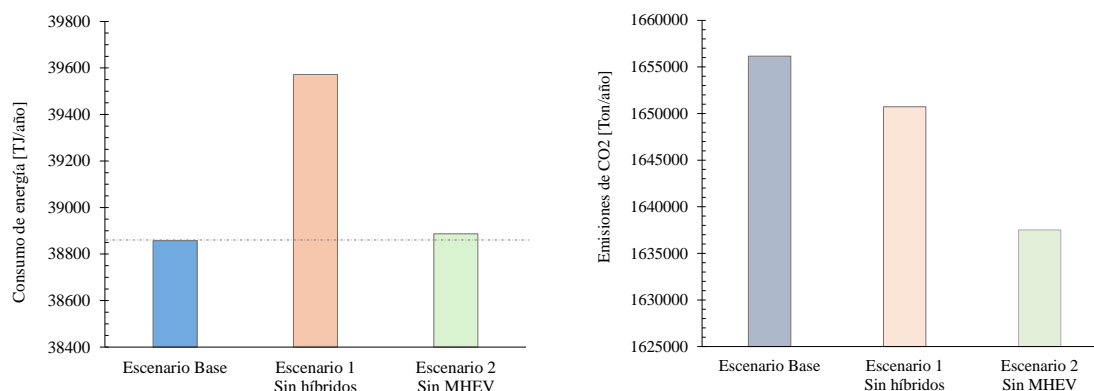


Figura 5. Comparación de consumo de energía y emisiones de CO₂.

Sin embargo, es de vital importancia no solo considerar el nivel de hibridación del vehículo sino también su rendimiento de combustible.

Los vehículos eléctricos híbridos completos y enchufables, tienen un rendimiento de combustible mayor que los vehículos convencionales, entre un 95% y 300%. En cuanto a las emisiones, no difieren significativamente en NO_x respecto a los vehículos de gasolina, pero los HEV reducen las emisiones de CO entre un 9% y un 62% en comparación con los vehículos de motor de combustión. Sin embargo, los HEV y PHEV emiten entre 21% y 37% más emisiones de PM que los vehículos eléctricos híbridos con tecnología MHEV.

Por último, con base en el análisis de energía se puede decir que el parque automotor se ve beneficiado por la incorporación de vehículos HEV y PHEV, pero los vehículos MHEV no representan una mejora significativa, lo cual es reflejo de lo que sucede con las emisiones de CO₂.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen al grupo de investigación en Gestión Energética (GENERGÉTICA), a la Universidad Tecnológica de Pereira y a la Universidad EAFIT, por su contribución al desarrollo de esta investigación. Así mismo, al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Minambiente) por contribuir con la información relevante para el estudio y a la Fundación Suiza de Cooperación para el Desarrollo Técnico – Swisscontact por la financiación entregada.

6. Referencias

- [1] R. P. Langford and K. Gillingham, "Quantifying the benefits of the introduction of the hybrid electric vehicle," *Int J Ind Organ*, vol. 87, p. 102904, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.IJINDORG.2022.102904.
- [2] J. A. Sanguesa, V. Torres-Sanz, P. Garrido, F. J. Martinez, and J. M. Marquez-Barja, "A review on electric vehicles: Technologies and challenges," *Smart Cities*, vol. 4, no. 1. MDPI, pp. 372–404, Mar. 01, 2021. doi: 10.3390/smartcities4010022.
- [3] Presidencia de México, "DOF - Diario Oficial de la Federación." Accessed: Jun. 17, 2024. [Online]. Available: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5599614&fecha=03/09/2020#gsc.tab=0
- [4] Mobility Portal: Noticias sobre vehículos eléctricos, "ANAC plantea eliminar arancel aduanero a vehículos eléctricos e híbridos." Accessed: Jun. 17, 2024. [Online]. Available: <https://mobilityportal.lat/anac-arancel-aduanero-electricos-hibridos/>
- [5] D. C. Concejo de Bogotá, "Acuerdo 780." Accessed: Jun. 17, 2024. [Online]. Available: <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Normal.jsp?i=100965>
- [6] Congreso de Colombia, "Ley 1964," 2019.
- [7] International Energy Agency (IEA), "Transport Sector Overview." Accessed: Jun. 17, 2024. [Online]. Available: <https://www.iea.org/energy-system/transport>
- [8] B. M. Al-Alawi and T. H. Bradley, "Review of hybrid, plug-in hybrid, and electric vehicle market modeling Studies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 21, pp. 190–203, May 2013, doi: 10.1016/J.RSER.2012.12.048.
- [9] P. Karjalainen *et al.*, "Real-world emissions of nanoparticles, particulate mass and black carbon from a plug-in hybrid vehicle compared to conventional gasoline vehicles," *Environmental Advances*, vol. 15, p. 100454, Apr. 2024, doi: 10.1016/J.ENVADV.2023.100454.
- [10] Y. Wang *et al.*, "Real driving energy consumption and CO₂ & pollutant emission characteristics of a parallel plug-in hybrid electric vehicle under different propulsion modes," *Energy*, vol. 244, p. 123076, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.ENERGY.2021.123076.
- [11] R. Huang, J. Ni, T. Zheng, Q. Wang, X. Shi, and Z. Cheng, "Characterizing and assessing the fuel economy, particle number and gaseous emissions performance of hybrid electric and conventional vehicles under different driving modes," *Atmos Pollut Res*, vol. 13, no. 12, p. 101597, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.APR.2022.101597.
- [12] Consumo Vehicular Chile, "Buscador de etiqueta." Accessed: Jun. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.consumovehicular.cl/etiqueta/buscador#/>
- [13] The International Council on Clean Transportation (ICCT), "Tools for Policy & Research - International Council on Clean Transportation." Accessed: Jun. 17, 2024. [Online]. Available: <https://theicct.org/tools-for-policy-and-research/>
- [14] I. Veza, M. Z. Asy'ari, M. Idris, V. Epin, I. M. Rizwanul Fattah, and M. Spraggon, "Electric vehicle (EV) and driving towards sustainability: Comparison between EV, HEV, PHEV, and ICE vehicles to achieve net zero emissions by 2050 from EV," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 82, pp. 459–467, Nov. 2023, doi: 10.1016/J.AEJ.2023.10.020.

- [15] A. Tansini, J. Pavlovic, and G. Fontaras, "Quantifying the real-world CO₂ emissions and energy consumption of modern plug-in hybrid vehicles," *J Clean Prod*, vol. 362, p. 132191, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2022.132191.
- [16] A. García, J. Monsalve-Serrano, D. Villalta, and M. Guzmán-Mendoza, "Impact of low carbon fuels (LCF) on the fuel efficiency and NO_x emissions of a light-duty series hybrid commercial delivery vehicle," *Fuel*, vol. 321, p. 124035, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.FUEL.2022.124035.
- [17] A. Wang, J. Xu, M. Zhang, Z. Zhai, G. Song, and M. Hatzopoulou, "Emissions and fuel consumption of a hybrid electric vehicle in real-world metropolitan traffic conditions," *Appl Energy*, vol. 306, p. 118077, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.APENERGY.2021.118077.
- [18] M. V. Prati and M. A. Costagliola, "Real driving emissions of Euro 6 electric/gasoline hybrid and natural gas vehicles," *Transp Res D Transp Environ*, vol. 113, p. 103509, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.TRD.2022.103509.
- [19] H. Jiang *et al.*, "Exhaust aftertreatment device-derived ammonia emissions from conventional and hybrid light-duty gasoline vehicles over different driving cycles," *J Hazard Mater*, vol. 458, p. 131914, Sep. 2023, doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2023.131914.
- [20] R. Huang, J. Ni, T. Zheng, Q. Wang, X. Shi, and Z. Cheng, "Characterizing and assessing the fuel economy, particle number and gaseous emissions performance of hybrid electric and conventional vehicles under different driving modes," *Atmos Pollut Res*, vol. 13, no. 12, p. 101597, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.APR.2022.101597.
- [21] J. Squalli, "Greening the roads: Assessing the role of electric and hybrid vehicles in curbing CO₂ emissions," *J Clean Prod*, vol. 434, p. 139908, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2023.139908.
- [22] P. Karjalainen *et al.*, "Real-world emissions of nanoparticles, particulate mass and black carbon from a plug-in hybrid vehicle compared to conventional gasoline vehicles," *Environmental Advances*, vol. 15, p. 100454, Apr. 2024, doi: 10.1016/J.ENVADV.2023.100454.
- [23] Departamento de transporte - US and NHTSA, "Vehículos Eléctricos e Híbridos." Accessed: May 09, 2024. [Online]. Available: <https://www.nhtsa.gov/es/seguridad-de-vehiculos/vehiculos-electricos-e-hibridos>