



Universidad de
Oviedo



ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN.

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

ÁREA DE MÁQUINAS Y MOTORES TÉRMICOS

**ANÁLISIS DE LA MOVILIDAD SOSTENIBLE:
COCHE ELÉCTRICO
VERSUS
COCHE PROPULSADO POR HIDRÓGENO
VERSUS
USO DE BIOCARBURANTES**

**D. ÁLVAREZ GARCÍA, ADRIÁN
TUTOR: D. JUAN CARLOS RÍOS FERNÁNDEZ**

FECHA: mayo de 2022

ÍNDICE

1. RESUMEN	4
2. PALABRAS CLAVE.....	5
3. INTRODUCCIÓN.....	6
3.1. Coche eléctrico.....	7
3.2. Coche propulsado por hidrógeno	9
3.3. Biocarburantes	11
4. METODOLOGÍA.....	15
5. RESULTADOS	18
5.1. Análisis de la eficiencia energética.....	18
5.2. Análisis de las emisiones de materia particulada	20
5.3. Análisis de las emisiones de GEI.....	22
6. CONCLUSIÓN	25
7. BIBLIOGRAFÍA.....	27

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos numéricos sobre la energía consumida por kilómetro	20
Tabla 2. Datos numéricos sobre la cantidad de materia particulada emitida	22
Tabla 3. Datos numéricos sobre gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera	24

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Energía consumida por kilómetro recorrido por cada tipo de vehículo	19
Ilustración 2. Cantidad de materia particulada expulsada.....	21
Ilustración 3. Gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera.....	23

1. RESUMEN

Los coches propulsados por combustibles fósiles son el principal medio de transporte en todo el mundo, lo que implica un alto nivel de emisiones de gases contaminantes a la atmosfera. En la actualidad se ha tomado conciencia de este fenómeno y se está tratando de disminuir estas emisiones a través del desarrollo de otras fuentes de energía alternativas, por ejemplo, la energía eléctrica, el hidrógeno y los biocarburantes. En este análisis aplicaremos estas tres opciones a los automóviles, más concretamente a los coches, describiendo cuál es su principio de funcionamiento y también los tipos que podemos encontrar. Seguidamente realizaremos una comparativa en diferentes aspectos para conocer cuál es la mejor opción en cada caso, pues se trata de una elección complicada para el consumidor porque ninguna de estas fuentes de energía destaca sobre las demás en todos los aspectos.

2. PALABRAS CLAVE

PEMFC: pilas de membrana de intercambio protónico (proton exchange membrane fuel cell)

LCA: evaluación del ciclo de vida

O₂: oxígeno

CO₂: dióxido de carbono

H₂O: agua

Petr: combustibles derivados del petróleo, se incluyen diésel y gasolina

EV: vehículos eléctricos alimentados a través de baterías (Electric Vehicles)

BioC: biocarburantes en estado líquido, incluyendo dentro de ellos biodiésel y bioetanol

FCV: vehículos propulsados por pila de hidrógeno (Fuel Cell Vehicles)

GEI: gases de efecto invernadero

3. INTRODUCCIÓN

Contexto del trabajo

La sostenibilidad ha ido adquiriendo un papel muy importante con el paso de los años; por lo que ha llegado a tenerse más en cuenta que otras tendencias como la calidad, la velocidad y la flexibilidad de producción que fueron las principales prioridades en los últimos 25 años. La atención que se presta a la sostenibilidad surge en su mayor parte de la necesidad de alcanzar un equilibrio entre desarrollo humano y conservación del medio ambiente [1]. Las principales razones de la aparición de fuentes de energía alternativas son, por un lado, tratar de reducir la emisión de gases contaminantes, ya que, la estabilidad global nunca se ha visto amenazada de manera tan grave como lo está por el cambio climático, se trata probablemente del desafío más crítico en la actualidad [2, 3]. Y por otro lado, tratar de evitar la rápida disminución de los recursos empleados en la fabricación de combustibles fósiles debido a su alta tasa de consumo [4].

Motivación

Esta rápida disminución de los recursos naturales a causa del empleo de combustibles fósiles y el rápido consumo ha producido un gran incremento en su precio de adquisición, llegando este a incrementarse en un 16% la gasolina y un 23% el diésel durante el año en curso [5]. Lo que ha producido que la población se replantee la opción del empleo de otros combustibles y tecnologías. Actualmente hay poco conocimiento sobre ellas, ya que, muchas no adquirieron una gran fama o están aún en vías de desarrollo y la población desconoce tanto su funcionamiento como cuáles son sus aspectos medioambientales y beneficios.

Objetivos

Hoy en día, podemos encontrar una gran variedad de tipos de combustibles para vehículos. Aun así, los impactos ambientales provocados por cada tecnología hacen que sea complicado encontrar una opción única. En este análisis realizaremos una comparativa aplicada a los coches de los distintos tipos de energías alternativas, como son, el coche eléctrico, el coche propulsado por hidrogeno y el uso de biocarburantes. Pues son estos, junto con los camiones, los que producen la mayor parte de las emisiones en el transporte por carretera [6-8]. Finalmente, discutiremos sobre su estado actual y los beneficios medioambientales que pueden llegar a proporcionar.

Ideas de partida

Partimos de la idea de que en la actualidad los combustibles usados en la gran mayoría de los vehículos son los combustibles fósiles, ya sean, gasolina o diésel. Pudiendo considerarse como el rival a batir, pues han tenido un dominio aplastante sobre el resto de tecnologías a lo largo de los años [9]. También es cierto que actualmente el único sistema de transporte que podría intentar hacerle frente serían los vehículos eléctricos debido a su reciente auge por marcas muy reconocidas como Tesla, Hyundai o Ford. Pero no se pueden comparar en niveles de autonomía, rendimiento y coste de adquisición [10]. Por estas razones, son más usados los vehículos híbridos pues sus prestaciones mejoran en comparación con los vehículos puramente eléctricos y sus emisiones son más bajas que las de los vehículos diésel o gasolina, aportándoles una mayor competitividad en el mercado. Aun así, los combustibles fósiles se siguen imponiendo.

A continuación, se comentarán de forma general cómo funcionan y algunas características de cada una de las energías alternativas que se tratarán en este análisis:

3.1. Coche eléctrico

Los vehículos eléctricos pueden ser de dos tipos: los totalmente eléctricos y por otro lado los vehículos híbridos. En este caso trataremos los totalmente eléctricos.

Las baterías son el sistema de almacenamiento de la energía en los vehículos eléctricos, siendo esta su única fuente de energía, que puede estar alimentada por la corriente eléctrica o a través de placas solares integradas en el techo del vehículo. Hasta el momento, las baterías presentan el inconveniente de su gran peso, su baja autonomía y serios problemas con respecto al tiempo de recarga [10]. En función de los requerimientos del coche existen diferentes tipos de baterías:

- Las baterías de plomo-ácido son asequibles económicamente, sin embargo, tienen una autonomía limitada.
- Las baterías de níquel-cadmio poseen una mayor autonomía que las de plomo-ácido, pero su precio es más elevado.
- Las baterías de níquel-metal-hidruro son más respetuosas con el medio ambiente y son las que se emplean actualmente en algunos vehículos híbridos.
- Las baterías de iones de litio dan la mayor autonomía debido a su alta energía específica, llegando a ser de 150Wh/kg [11], y un rendimiento excelente con un elevado coste. Son las baterías más pequeñas, llegando a ocupar un tercio del espacio de una batería níquel-cadmio.

Se trata de un tipo de coche pensado para grandes ciudades con mucho tráfico y donde no se requiere una elevada cantidad de energía suministrada por parte de las baterías, como podría ser el caso de la circulación por autopista o autovía, donde el consumo de energía se incrementa en gran medida. La principal ventaja de este tipo de vehículos es que no producen emisiones contaminantes ni tampoco emisiones sonoras. La eliminación del ruido de los coches eléctricos es por la sustitución del motor de combustión interna por motores eléctricos. La principal razón de estos ruidos es la explosión de la gasolina en las camisas de los pistones producida por la ignición de las bujías. En el caso de los vehículos diésel la explosión es provocada por la compresión del combustible producida en el punto muerto superior de la carrera del pistón.

Cabe destacar que hay dos aspectos que pueden llegar a reducir la eficiencia del motor eléctrico o incluso generarle problemas. Se trata de las vibraciones que pueda producir el terreno y de la suciedad que se pueda originar en la zona de contacto entre rotor y estator, como se muestra en la Figura 1. Las vibraciones pueden llegar a producir desalineamientos entre el rotor, directamente conectado al eje de salida, y el estator, situado en las paredes de la carcasa. Este fenómeno puede llegar a producir desde una pérdida de eficiencia en el motor hasta, en caso de elevadas frecuencias, el colapso de algún componente. Para evitar la entrada de suciedad basta con el aislamiento de los componentes internos del motor. Sin embargo, si se aplica este razonamiento no estaríamos permitiendo la disipación del calor generado. En la realidad lo que llevan estos motores es un ventilador interno seguido de un filtro para evitar esa entrada de suciedad.

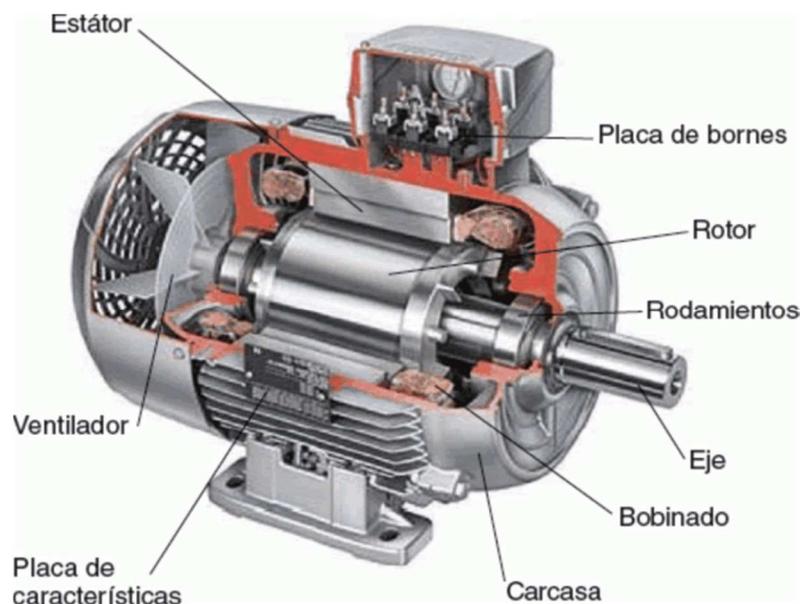


Figura 1. Partes de un motor eléctrico

Fuente: [30]

3.2. Coche propulsado por hidrógeno

El hidrógeno tiene dos aplicaciones en la automoción: las pilas de combustible y los motores de combustión interna alternativos. En ambas aplicaciones se combina con el oxígeno, generando electricidad en el caso de las pilas de combustible y energía mecánica en el caso de los motores térmicos. En ambos casos las emisiones a la atmósfera son únicamente vapor de agua, lo que implica grandes beneficios medioambientales [11].

Actualmente se utilizan diversas tecnologías para realizar este proceso, como son la electrolisis del agua, el reformado de hidrocarburos y la gasificación de biomasa y de hidrocarburos. En función del proceso elegido para la creación del hidrógeno producirá que este pase a tener una denominación concreta:

- Hidrógeno negro: es obtenido a partir de hidrocarburos aplicándoles un reformado o una gasificación. Se trata de un hidrógeno altamente contaminante por las emisiones producidas.
- Hidrógeno gris: es obtenido a partir de gas natural, combustibles fósiles y carbón. Sus emisiones son CO₂.
- Hidrógeno azul: tiene la misma forma de obtención que el oxígeno gris pero su principal diferencia es que no produce CO₂.
- Hidrógeno verde: es producido por fuentes de energía renovables con bajas emisiones.

La única tecnología sostenible y respetuosa con el medio ambiente a día de hoy, es la electrolisis del agua a partir de electricidad generada a través de fuentes renovables (hidrógeno verde).

En nuestro caso tomaremos como referencia los coches propulsados por pila de hidrógeno, principalmente porque en el caso de motor alternativo no estaríamos evitando el uso de combustibles fósiles, simplemente se estaría reduciendo su impacto ambiental. La pila de combustible es un dispositivo electroquímico que transforma la energía química en energía eléctrica y en calor. Como resultado de la reacción electroquímica se produce H₂O y electricidad. El agua abandona la pila de combustible a través de los electrodos y la corriente eléctrica es transportada hacia el motor.

Para la propulsión de estos vehículos, solo se necesita una sustancia que tienda a oxidarse químicamente y que pueda suministrarse de forma continua a la pila. De la misma manera, cualquier sustancia susceptible a la reducción química de forma suficientemente rápida puede

servir como oxidante. Generalmente el hidrógeno y el oxígeno son el combustible y oxidante habituales en la mayor parte de las aplicaciones.

Hay diferentes tipos de pilas de combustible en función de los elementos que se usarán como oxidante y reductor. Para el caso que nos ocupa, que es el del transporte, se utilizan las pilas de membrana de intercambio protónico (PEMFC). Este tipo de pila está compuesta por un ánodo y un cátodo. El ánodo, donde se reduce el H_2 en dos protones H^+ y cátodo, donde se reaccionan los protones de H^+ y el oxígeno (O_2). Las reacciones que tienen lugar en cada uno de los electrodos son:

- Reacción en el ánodo: $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$
- Reacción en el cátodo: $\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$
- Reacción global: $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$

El oxígeno será directamente obtenido del aire ambiente, donde se encuentra en estado gaseoso. Mientras que el hidrógeno se encontraría en el depósito del coche en estado líquido por las elevadas presiones a las que se somete para comprimirlo. A medida que el vehículo necesita el hidrógeno, este sale del depósito y se va expandiendo a medida que disminuye la presión. Llegando de esta manera en estado gaseoso a la PEMFC.

La base del funcionamiento de este tipo pila de combustible consiste en la separación de los electrones del hidrógeno en presencia de un catalizador, generalmente de platino o paladio [10, 11]. Una vez separados, los electrones viajan hacia el cátodo por un circuito exterior generando la corriente eléctrica, véase todo ello representado gráficamente en la Figura 2.

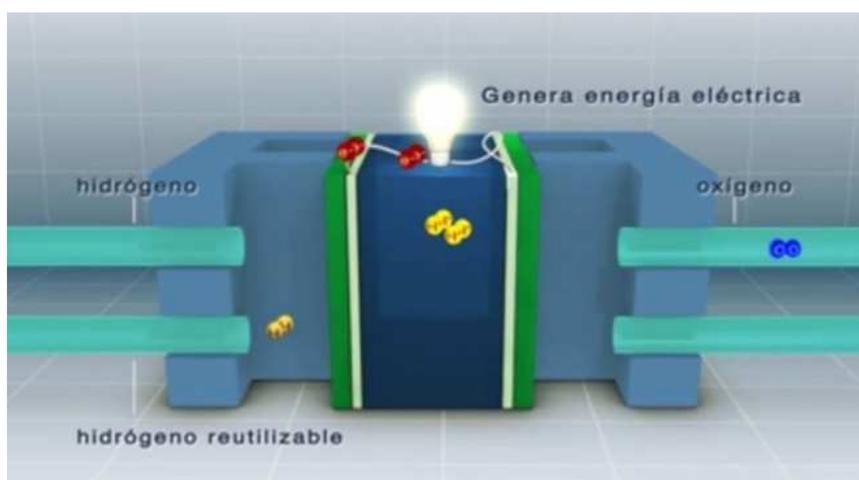


Figura 2. Esquema del funcionamiento de una pila de combustible de oxígeno
Fuente: [12]

La corriente eléctrica generada por una única pila de combustible tiene una tensión muy baja, del orden de 0,6-0,8 voltios [12]. Una de las características más importantes de esta tecnología es que se pueden conectar pilas de combustible en serie hasta obtener la tensión necesaria. Las marcas que están trabajando con esta tecnología están usando en torno a 1500-2000 células por coche [10].

Las pilas de combustible necesitan una mayor exigencia en la refrigeración, pues están diseñadas para trabajar en un rango concreto de temperaturas. Para maximizar su eficiencia se requiere que el hidrógeno tenga un alto grado de pureza, pudiendo así llegar a eficiencias de más del 60%.

3.3. Biocarburantes

Los biocombustibles son un tipo de combustibles producidos a partir de la biomasa. Estos se pueden presentar en distintas formas, ya sea, sólida (pellets), líquida (biodiésel) o incluso gaseosa (biogás). La forma sólida es utilizada para alimentar calderas y hornos tanto a nivel industrial como a nivel de viviendas. La forma líquida está principalmente enfocada al sector automovilístico como fuente de propulsión alternativa. Y la forma gaseosa se utiliza principalmente como generador de energía, ya sea en calderas, como los biocombustibles sólidos, generando energía térmica o en motores o turbinas para generar energía eléctrica. A partir de ahora nos centraremos en los biocombustibles en estado líquido por ser los utilizados en la propulsión de vehículos.

Dentro de los biocombustibles podemos encontrar los biocarburantes, que es el tema que nos ocupa, los cuales pueden ser directamente suministrados a los motores de combustión interna de todo tipo de vehículos, siempre y cuando no se superen unos porcentajes concretos, generalmente no más del 10%. El uso de unos valores mayores a los establecidos implicará que será necesario hacer modificaciones en el motor. Los biocarburantes son creados mediante materias primas vegetales y reacciones fisicoquímicas y los encontraremos principalmente en estado líquido. Los principales tipos de biocarburantes son tres y equivalen al 95% de los biocarburantes utilizados en Europa [13]. Se trata de: biodiesel, HVO y bioetanol.

- Biodiesel: es una alternativa al gasóleo que se obtiene tanto de aceites vegetales vírgenes como de aceites vegetales usados y grasas animales a través de un proceso de esterificación.
- HVO: son las siglas de Hidrotreated Vegetable Oil, también conocido como diésel verde. Forma parte de los combustibles diésel renovables derivados de biomasa

(aceite de cocina usado) y producidos a través de pirólisis, gasificación o un tratamiento con hidrógeno.

- Bioetanol: es un aditivo o alternativa a la gasolina que se obtiene de materias primas ricas en azúcar, almidón o celulosa a través de un proceso de fermentación.

La idea de la que parten los biocarburantes es que la biomasa se considera neutra en emisiones. La biomasa está formada por residuos de origen vegetal y animal que por sí mismos no tienen ningún impacto negativo en el medio ambiente (emisiones contaminantes). El único momento donde se producen emisiones de CO_2 es durante la quema, para transformar la biomasa en biocombustible. Se denomina neutra a la biomasa porque el CO_2 emitido durante la quema es absorbido por las plantas durante el proceso de fotosíntesis. Este proceso de creación y absorción de carbono por parte de las plantas se puede ver más claramente con el esquema que se muestra en la Figura 3.

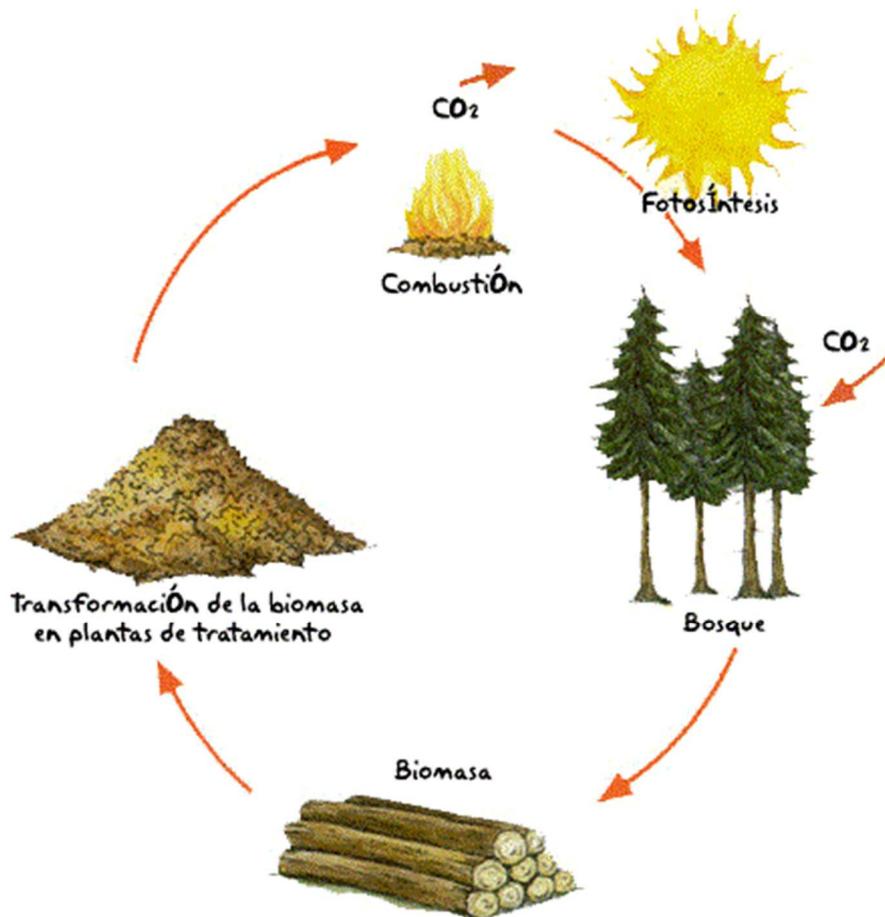


Figura 3. Ciclo del carbono en la quema de biomasa

Fuente: [31]

En la Figura 3 se muestra un ciclo genérico de la transformación de la biomasa. A continuación, se particularizará para el caso de su uso en el transporte: una vez que las plantas son recogidas de la plantación son transportadas a las biorrefinerías donde se procede a su transformación en combustible a través de distintos procesos, como pueden ser la transesterificación, la fermentación o la hidrólisis. En la práctica, esta transformación se realiza con un pequeño aporte de combustibles fósiles para favorecer el proceso de ignición y, además, otorgarles una mayor calidad a los biocarburantes. Esta adición se realiza una vez se han producido los respectivos procesos de transformación de materias primas, antes de ser vertido en el depósito del vehículo. Una vez vertidos en los diferentes vehículos provocarán la emisión de CO₂ durante su funcionamiento. Ese CO₂ será posteriormente absorbido por las plantas de los huertos o plantaciones. Como se puede ver en la Figura 4 el razonamiento es el mismo siempre, lo único que puede variar es el número de etapas que compongan el ciclo.

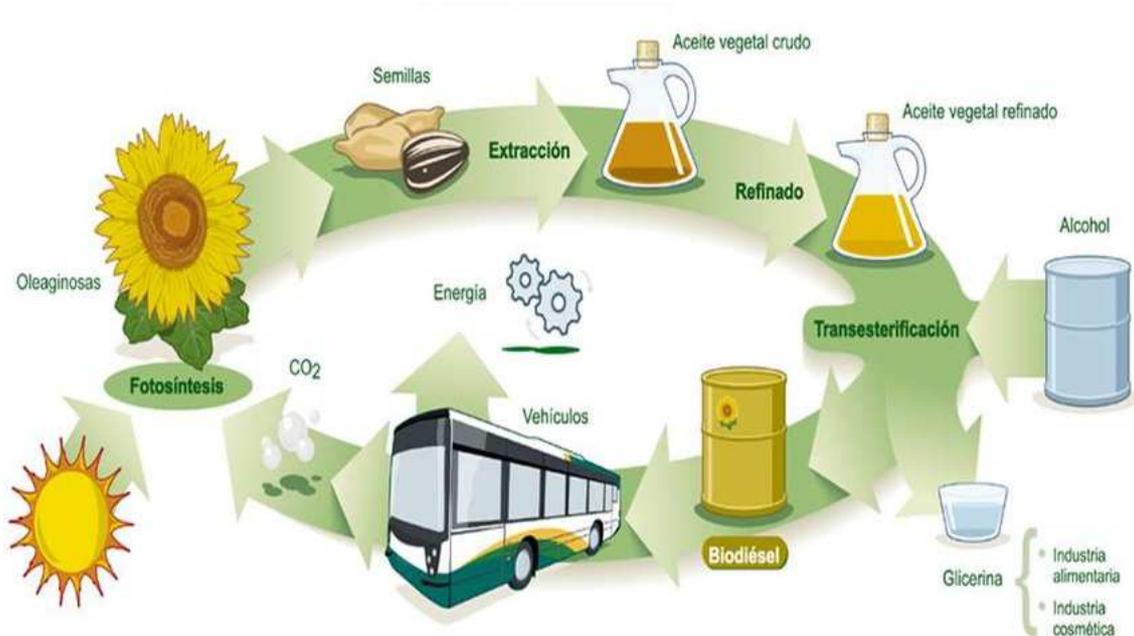


Figura 4. Ciclo de vida de los biocarburantes
Fuente: [32]

Los biocarburantes son una tecnología que necesita un grado muy alto de calidad en la mezcla para ser capaz de intentar competir con el resto de las tecnologías mencionadas [10]. La dificultad para conseguir la alta calidad es lo que produce que sea muy poco común encontrar coches que utilicen un 100% de biocarburantes. Lo más común es encontrarlos combinados con gasolina o diésel. Se suelen combinar en pequeñas proporciones para que no provoquen averías en pistones, juntas de caucho o inyectores [11]. Se trata de introducir un fluido en un motor que no ha sido diseñado en un inicio para ello.

Se trata de un tipo de combustible alternativo que aún está en período de desarrollo. Los procesos de transformación realizados encarecen su coste en gran medida, llegando a doblar al de la gasolina [14]. Tienen también una eficiencia en la producción bastante baja, esto es, que para producir biocarburantes hace falta una gran cantidad de materia prima y, por consiguiente, grandes plantaciones. Con respecto al tema de las plantaciones hay diferentes factores que hay que tener en cuenta. Como pueden ser, la ubicación, la extensión y el clima. Lo que implica que, en función del lugar en el que resida la gente, el coste de adquisición de las materias primas puede variar en gran medida.

4. METODOLOGÍA

La investigación consistió en la búsqueda de artículos científicos relacionados con los impactos ambientales que provocaban los vehículos eléctricos, los propulsados por hidrógeno y los biocarburantes en la Web of Science y en la página web del IDAE, durante el periodo de tiempo de diciembre de 2021 a mayo de 2022.

Web of Science es un portal de búsqueda reservado para investigadores y estudiantes que da acceso a un amplio catálogo de artículos de carácter científico, permitiendo acceder a ellos de manera gratuita. El idioma predominante es el inglés, por lo tanto, es muy recomendable a la hora de buscar información realizarlo en este idioma para tener un mayor número de resultados.

IDAE son las siglas de Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Se trata de una página web que proporciona datos sobre los coches matriculados en España, como por ejemplo, su fuente de propulsión, la cantidad de emisiones de CO₂, e incluso, legislación al respecto.

Las palabras clave utilizadas en la búsqueda fueron “electric vehicle”, “hydrogen”, “biofuels”, “advantages”, “disadvantages”, “comparative” y “environmental”. Se utilizaron estas palabras por ser las más relacionadas con el tema a tratar y con los objetivos marcados. Las palabras más importantes en la búsqueda fueron “electric vehicle”, “hydrogen” y “biofuels” por ser las fuentes de energía alternativa que se debían tratar en el trabajo. La función del resto de palabras clave era delimitar la búsqueda de artículos y centrarse en la comparación en diferentes aspectos ambientales de estas tecnologías.

En la búsqueda se utilizaron operadores booleanos para buscar varias palabras clave al mismo tiempo y se definió que estas debían aparecer al menos en el título, en el abstract o en la descripción del artículo.

Se aceptarían aquellos artículos que cumplieren las siguientes características:

- Se obtuvieran de revistas científicas.
- Que estuvieran en inglés o en español.
- Que contenían en el título, abstract o descripción las palabras clave o que tratase sobre algunas de las tecnologías a estudiar.
- Datos numéricos obtenidos en Europa o de carácter global, sin especificar una zona geográfica en concreto.

Mientras que se rechazarían aquellos que:

- En el título no contuviesen ninguna de las palabras clave.

- Artículos que no trataran del tema del trabajo.
- Artículos que proporcionaran datos que no fueran de coches de pasajeros.
- Documentos que no proporcionaban el texto completo.
- Artículos que no analizaban el impacto ambiental de las fuentes de energía.

Para comprobar si los artículos que aparecían en cada búsqueda eran adecuados o no se procedía de la siguiente manera: en primer, se comprobaba si el título contenía alguna de las palabras clave o estaba relacionado con el tema del trabajo. En caso afirmativo, se procedía a revisar el abstract y a comprobar si, ciertamente, cumplía las características mencionadas anteriormente. Si todo esto se cumplía, el artículo se guardaba y se leía al completo para analizar si contenía la información y los datos que posteriormente se utilizarían.

En la página del IDAE se encontró un artículo sobre los diferentes combustibles alternativos aplicados a los vehículos de transporte de pasajeros, donde explican los tipos que se pueden encontrar y su funcionamiento. También se comenta de forma muy breve los beneficios ambientales que producen cada uno de ellos. Este artículo será el que posteriormente se utilizará como base para realizar la explicación de cada una de las tecnologías en la introducción, más concretamente en el apartado de ideas de partida y que sería contrastado con otros artículos obtenidos a través de la Web of Science.

En el portal de la Web of Science, los resultados aparecen con un formato de visualización que muestra el título, los autores, el año de publicación y el abstract. Se realizaron 5 búsquedas. La primera de ellas fue utilizando las puertas lógicas AND donde se introdujeron las palabras “electric vehicle”, “hydrogen”, “biofuels”, “advantages” y “disadvantages”. Aparecieron 2 resultados en la búsqueda, ambos posteriores a 2010, pero solo uno cumplía los requisitos establecidos. En la segunda búsqueda se eliminaron las palabras “advantages” y “disadvantages” y se incluyeron “comparative” y “environmental”. El número de resultados se incrementó, obteniendo 15 en este caso. 3 de esos artículos trataban el tema de estudio, pero solo se pudo acceder al texto completo de uno, que posteriormente sería el que tomaríamos como referencia respecto a los impactos ambientales a estudiar. Las siguientes búsquedas se realizaron sobre artículos que proporcionaran datos del tipo numérico con los que crear los gráficos. En estas últimas búsquedas se trató de buscar datos individuales de cada fuente de energía, así como una explicación de su funcionamiento actual para comprobar si el artículo del IDAE estaba suficientemente actualizado. Las palabras utilizadas fueron “electric vehicle”, “hydrogen”, “biofuels”, “impacts” y “assessment”. Aparecieron 11 resultados en la búsqueda, pero solo 5 de ellos contenían los datos necesarios. Permitiendo de este modo poder comparar

los impactos medioambientales de las fuentes de energía alternativas en tres aspectos: eficiencia energética, emisión de partículas y emisión de GEI.

En los artículos utilizados finalmente se obtuvieron los datos de impactos medioambientales de los distintos tipos de tecnologías. Los datos que se utilizarían posteriormente para crear los gráficos habían sido obtenidos a través de la aplicación del método de evaluación del ciclo de vida. El método de evaluación del ciclo de vida (LCA) consiste en la evaluación de los impactos ambientales potenciales asociados con entradas y salidas conocidas, analizando los resultados de las fases de impacto para lograr unas mejores decisiones [15]. Los principales usos del método LCA son evaluar y comparar la carga ambiental de una variedad de tecnologías competidoras.

Esta comparativa consiste en un LCA simplificado que utiliza un modelo de punto medio. Todos los datos utilizados en esta evaluación fueron obtenidos de tres conjuntos de cuestionarios y las revisiones y estadísticas recientes [15-20]. Según las normativas internacionales, la metodología LCA se divide en cuatro etapas interrelacionadas: Meta y Definición de Alcance, Análisis de Inventario de Ciclo de Vida (LCI), Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida (LCIA) e Interpretación [21-23].

En este análisis se realizará desde dos puntos de vista, el del ciclo de vida del vehículo y el del ciclo de vida del combustible. El ciclo de vida del vehículo hace referencia a el impacto que provoca su diseño, montaje y eliminación. Y el ciclo de vida del combustible refleja el impacto desde la extracción de su materia prima hasta que es consumido por el coche, pudiendo dividirse este ciclo en dos partes: una primera desde que se extrae la materia prima hasta que se vierte en el tanque de combustible o el lugar donde almacene la energía, y una segunda desde el depósito hasta que es consumida por el automóvil [15, 24, 25]. Los datos de partida que se tomarán en esta comparativa han sido tomados de coches de pasajeros de un peso entre 1100-1400 kg. Los tres puntos clave que se estudiarán para los diferentes tipos de energía serán: la energía consumida por cada kilómetro recorrido, entendiéndose esta como una medida de eficiencia energética; la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero y la cantidad de partículas emitidas que influyen en la calidad del aire.

5. RESULTADOS

Los resultados que se mostrarán a continuación son una aproximación representativa de un conjunto muestral de valores. En ellas se representarán los aspectos mencionados anteriormente frente a los combustibles fósiles denominados como Petr, los biocarburantes denominados como BioC, la electricidad denominada como EV y el hidrógeno denominado como FCV.

5.1. Análisis de la eficiencia energética

Como se puede ver en la Ilustración 1 el FCV es la fuente de energía más eficiente respecto al ciclo de vida del combustible, seguida de los combustibles fósiles utilizados habitualmente. En cambio, si hablamos ahora del ciclo de vida del vehículo podemos apreciar claramente que en este aspecto el FCV ya no es la mejor opción, por lo que en este aspecto el claro vencedor serían los combustibles fósiles. Como se había mencionado anteriormente, nunca va a haber un claro ganador, puesto que en un mismo aspecto si cambias el punto de vista ya varían los resultados. En este estudio se dará como “mejor” alternativa aquella que considerando en conjunto su ciclo de vida de combustible y su ciclo de vida de vehículo den el menor valor.

La opción con un menor coste de energía serían los coches propulsados por hidrogeno o FCV porque este se produce a través de un proceso de combustión de gas natural en contacto con vapor de agua produciendo hidrógeno gris. Se trata de un proceso mucho más eficiente que el usado anteriormente de electrólisis que consistía en generar el hidrógeno verde a través del paso de una corriente eléctrica producida con fuentes renovables. También hay que tener en cuenta que se han reducido los costes de producción y mejorado la capacidad y hermeticidad del almacenamiento en los coches.

Cabe destacar que el alto consumo energético de los biocarburantes es debido al coste de producción tanto por parte de su fabricación a partir de materia prima vegetal, la cual necesita una alta calidad en el combustible producido, como por parte de las modificaciones necesarias en los motores [10, 15, 26].

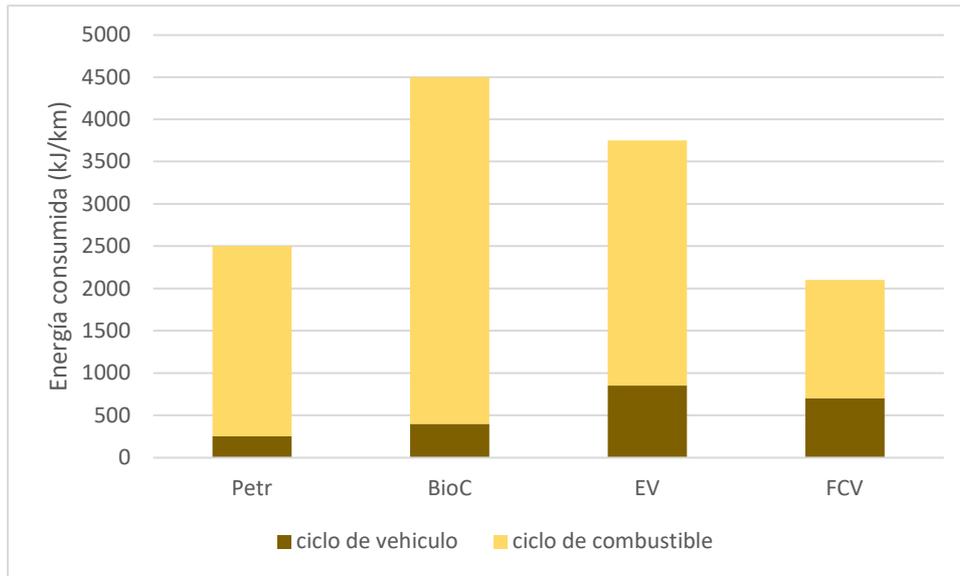


Ilustración 1. Energía consumida por kilómetro recorrido por cada tipo de vehículo

Fuente: elaboración propia según datos de [15-20]

Se procederá ahora a un análisis más cuantitativo de la eficiencia energética de las diferentes alternativas según los datos mostrados en la Tabla 1. Como se ha comentado previamente, la mejor opción desde un punto de vista global son los FCV con un consumo energético un 16% menor al de los combustibles fósiles tradicionales. Por separado resulta interesante destacar que los ciclos de vida de los vehículos eléctricos y de hidrógeno tienen el consumo de energía más elevado llegando a doblar e, incluso, triplicar el de las otras dos alternativas. Este aspecto se debe a que ambas producen electricidad a través de diferentes procesos y como ya se sabe la electricidad es una fuente de propulsión relativamente nueva que aún necesita tiempo para desarrollarla y explotar sus capacidades al máximo. Un gran inconveniente de la energía eléctrica es la autonomía producida por la degradación de las baterías con los ciclos de carga. A medida que se van aplicando ciclos de carga a las baterías su velocidad de descarga va aumentando.

Los derivados del petróleo muestran el valor más bajo en este aspecto debido al elevado interés mostrado por incrementar la eficiencia en los motores y de esta manera reducir su consumo. El valor obtenido es de 250 kJ/km, pero se trata de un valor que se puede reducir aún más. Paralelamente a esta mejora del rendimiento de los motores y producido por el avance de la tecnología, se empezaron a incluir equipamiento adicional (extras) en los vehículos. Gran parte de este equipamiento consumía energía eléctrica, la cual, debe ser producida por el motor, produciendo así un incremento del consumo. Con respecto a los BioC no hay mucho más que añadir en este aspecto pues se trata de coches similares a los propulsados por combustibles

fósiles. La diferencia en el consumo con respecto a los derivados del petróleo viene producida principalmente por las modificaciones necesarias en los motores de combustión y por la diferencia de calidad entre ambas fuentes de energía.

Desde el punto de vista del ciclo del combustible todas las opciones se presentan bastante similares exceptuando a los BioC. El caso de esta opción es un poco particular por su baja eficiencia en la fabricación del combustible y su aceptable rendimiento en los vehículos. Esta segunda afirmación se debe a que en los motores de los coches que van a ser propulsados con biocarburantes se parte de un motor convencional de gasolina o diésel y se realizan las modificaciones pertinentes sobre él. Los FCV poseen el menor consumo en la creación de su combustible, en este caso hidrógeno, debido a un cambio en el proceso de obtención. Sobre los derivados del petróleo no hay mucho que añadir, se producen mediante la quema del petróleo y es el único proceso que se utiliza hasta el momento.

El caso de los EV es ligeramente distinto porque en un inicio se partió de la quema para la obtención de la energía, pero a medida que fueron pasando los años se fueron reduciendo cada vez más las quemadas y utilizando energías renovables para su producción, lo que implicó un ligero descenso en el rendimiento. Un descenso que se consideró aceptable teniendo en cuenta la reducción del impacto medioambiental.

Tabla 1. Datos numéricos sobre la energía consumida por kilómetro
Fuente: elaboración propia según datos de [15-20]

Tecnologías	ciclo de vehículo (kJ/km)	ciclo de combustible (kJ/km)
Petr	250	2250
BioC	400	4100
EV	850	2900
FCV	700	1400

5.2. Análisis de las emisiones de materia particulada

Tratando ahora el tema de la calidad del aire, se puede decir que es un dato que permite estimar la contaminación del aire. La contaminación del aire implica un elevado riesgo para la salud humana, pudiendo llegar a considerarlo el mayor riesgo ambiental para la salud [27]. Al reducir los niveles de contaminación se pueden reducir la carga de enfermedades causadas por la calidad del aire, como son, enfermedades cardíacas, cáncer de pulmón y enfermedades respiratorias crónicas y agudas, incluido el asma [28]. En la Ilustración 2 podemos ver prácticamente un empate entre los coches de hidrógeno y los de combustibles fósiles usados comúnmente, pues durante años ha sido una gran preocupación la reducción de emisiones contaminantes de este tipo de coches. Tras varias investigaciones se optó por el uso de

catalizadores que pasaron a ser de uso obligatorio en 1992 [11], situados entre el motor y el tubo de escape, que están formados por una estructura de tipo colmena que contiene capas de metales nobles que reaccionan con los gases nocivos transformándolos en dióxido de carbono y vapor de agua.

También podemos ver claramente el elevado valor de los coches eléctricos y este dato puede parecer un poco contradictorio que unos coches que no tienen emisiones puedan tener tan alto impacto en la calidad del aire. La razón de este valor es que cuando hablamos de ciclo de combustible tomamos en cuenta las emisiones generadas desde su creación, como ya se ha mencionado anteriormente.

Actualmente, aún hay un elevado porcentaje de la electricidad generada que proviene de las fuentes de energía no renovables, como son el carbón, el gas natural y el petróleo. Aunque cada vez están tomando más peso otro tipo de fuentes renovables, como pueden ser la energía eólica y la solar. Lo que hace suponer que dentro de algunos años se reduzca sensiblemente ese valor.

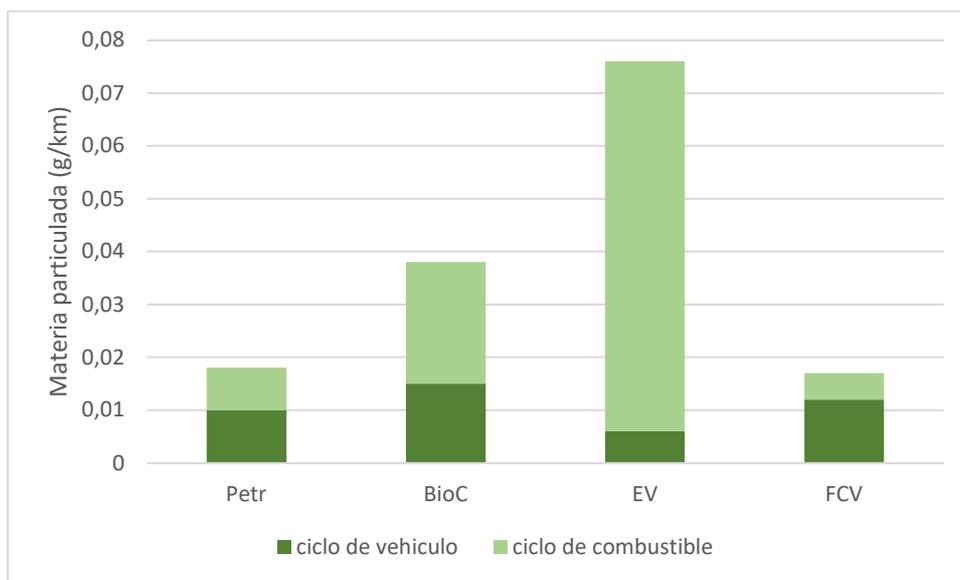


Ilustración 2. Cantidad de materia particulada expulsada
Fuente: elaboración propia según datos de [15-20]

A continuación, se muestra la Tabla 2, donde se pueden ver datos más concretos al respecto. Estos datos se muestran divididos en dos grupos: ciclo del vehículo y ciclo del combustible. Con esta división se intenta diferenciar en cierta medida el impacto en la calidad del aire que tiene la fabricación, uso y eliminación del vehículo del impacto producido por la creación de las fuentes de propulsión del mismo.

Como datos interesantes, cabe destacar la baja cantidad de materia particulada emitida durante el ciclo de vida del vehículo eléctrico, se trata del menor valor entre las tecnologías analizadas. Esto es así porque al alimentarse de electricidad no tienen emisiones de ningún tipo. El valor mostrado hace referencia a la eliminación de sus componentes porque algunas partes de los EV, como pueden ser las baterías, una vez finalizada su vida útil deben ser transportadas a lugares concretos para su eliminación. Se trata de elementos altamente contaminantes que impiden que el vehículo tenga emisiones de cualquier tipo durante su vida útil.

Con respecto al ciclo de vida del resto de los vehículos, todos tienen unos valores muy similares (en torno a 0,012 gr/km) pues todos ellos tienen tubo de escape por donde expulsan los gases producidos en los diferentes procesos de propulsión. En estos casos el factor diferencial viene marcado por la materia particulada emitida durante la producción del combustible. Resulta interesante comentar sobre este aspecto que los FCV tienen esas pequeñas emisiones por su proceso de producción. El proceso de producción de hidrógeno ha sido modificado para obtener un mayor rendimiento a costa de producir una ligera contaminación (hidrógeno gris). Como ya se ha comentado previamente, el hidrógeno era producido a través de la electrólisis del agua. Se trata de un método completamente sostenible en el que se extraía hidrógeno verde del agua haciendo pasar por ella una corriente eléctrica producida con fuentes renovables. Posteriormente se cambió este método por un proceso de combustión de gas natural en contacto con vapor de agua que ofrecía mejores prestaciones desde el punto de vista de la producción.

Tabla 2. Datos numéricos sobre la cantidad de materia particulada emitida
Fuente: elaboración propia según datos de [15-20]

Tecnologías	ciclo de vehículo (g/km)	ciclo de combustible (g/km)
Petr	0,01	0,008
BioC	0,015	0,023
EV	0,006	0,07
FCV	0,012	0,005

5.3. Análisis de las emisiones de GEI

El cambio climático está estrechamente relacionado con los gases de efecto invernadero emitidos y los principales causantes de este problema ha sido el gran uso que se les ha dado a los combustibles fósiles y la huella medioambiental que estos producen con su combustión [29]. Actualmente, las emisiones de GEI se han reducido en gran medida comparadas con las de años atrás a través de una mejora en la eficiencia del motor, aun así, tal como se muestra en la Ilustración 3, los combustibles fósiles siguen siendo la fuente que mayores emisiones provoca

porque, aunque se haya mejorado la eficiencia del motor, se han añadido equipamientos adicionales que incrementan el consumo. Sin embargo, el factor más influyente en las emisiones de GEI de los coches propulsados por combustibles fósiles es que la producción de estos conlleva una quema constante de petróleo.

La mejor opción para reducir este tipo de emisiones sería usar biocarburantes que pueden reducir las emisiones de GEI prácticamente un 50%. Como ya se ha comentado anteriormente, al provenir de origen vegetal, las plantaciones consumen el dióxido de carbono de la atmósfera que, idealmente, compensa con el que se emitirá en la quema al producir los biocarburantes. En realidad, sí que se produce una reducción de CO₂, pero no es completa, ya que en la producción de biocarburantes se utiliza un aporte de combustible fósil. La reducción de CO₂ puede variar entre un 40% y un 60%, dependiendo de la calidad de las materias primas y el aporte de combustible fósil.

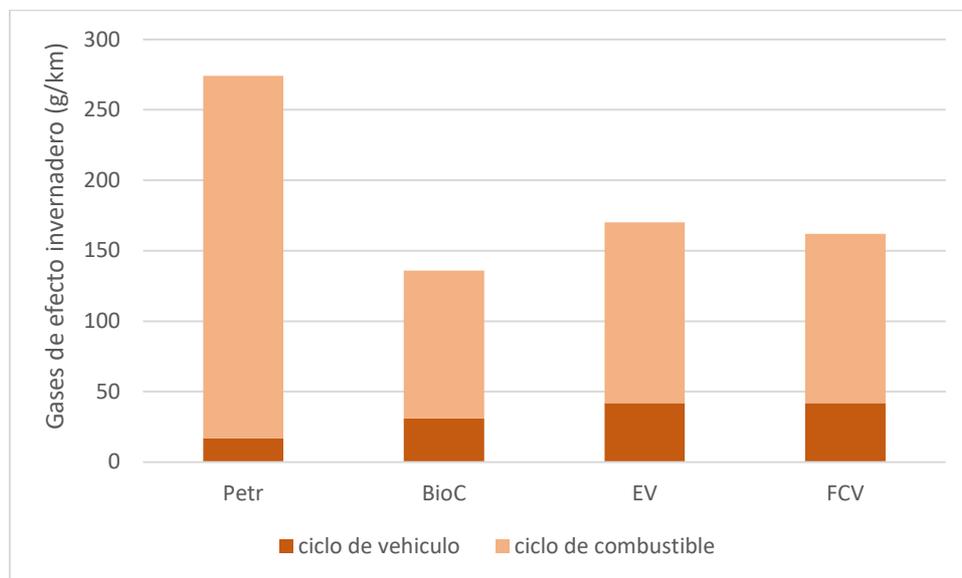


Ilustración 3. Gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera
Fuente: elaboración propia según datos de [15-20]

Como acabamos de ver, los biocarburantes permiten reducir en gran medida las emisiones de dióxido de carbono, siempre y cuando el 100% del combustible usado sea un tipo de biocarburante. Una de las grandes ventajas de este tipo de combustible es que se puede combinar en pequeñas proporciones, no más del 10%, con los combustibles habituales (diésel y gasolina) sin necesidad de realizar modificaciones en el motor y llegando a reducir en torno a un 4% o 5% las emisiones de CO₂.

En la Tabla 3 se dispone de las cantidades exactas de emisiones de GEI utilizados para la elaboración de la Ilustración 3. Se procederá, a continuación, a explicar algunos de estos datos que puedan resultar especialmente interesantes o curiosos.

Partiendo de los datos de ciclos de vida de vehículo se puede ver que el menor valor de emisiones lo tienen los combustibles fósiles. El argumento para defender esta afirmación es la antigüedad de los combustibles fósiles con respecto al resto de competidores, lo que implica que han tenido más tiempo para mejorarlos desde un punto de vista de prestaciones como desde un punto de vista de sostenibilidad y consumo. Un claro ejemplo es la implementación de catalizadores en el conducto de salida de gases del motor.

Se puede ver también que los EV y los FCV tienen el mismo valor de emisiones de GEI. La razón de estos valores es la siguiente: si bien se tratan de dos fuentes de energía diferentes, ambas impulsan los vehículos con energía eléctrica. Lo que implica que los vehículos van a ser muy similares, tan solo pequeñas diferencias como la existencia o no de un depósito y un tubo de escape. Cabe destacar que estas afirmaciones solo son correctas si se refieren al vehículo, en caso de hablar de la fuente de propulsión los valores cambian al tratarse de dos procesos completamente diferentes para la obtención de electricidad. En la Tabla 3 se ve claramente que estos valores difieren, aunque no en gran medida porque ambos procesos implican una quema, de carbón en el caso de los EV y de gas natural en el caso de los FCV.

Tabla 3. Datos numéricos sobre gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera
Fuente: elaboración propia según datos de [15-20]

Tecnologías	ciclo de vehículo (g/km)	ciclo de combustible (g/km)
Petr	17	257
BioC	31	105
EV	42	128
FCV	42	120

6. CONCLUSIÓN

Como ya se planteaba al inicio, no hay una opción única con respecto a que fuente de energía elegir, en este estudio se plantearon distintos aspectos medioambientales causados por los automóviles y se pudo observar que en función de que aspecto le interese más al comprador puede variar la elección o incluso no ser una única opción. Como conclusiones destacables tenemos que los coches de hidrógeno han sido mejorados en gran medida, lo que ha hecho que su eficiencia energética aumente hasta llegar a superar notablemente a los combustibles fósiles y con unos valores significativamente bajos tanto en gases de efecto invernadero como de materia particulada, lo que podría permitirle convertirse en un gran competidor en el sector automovilístico. Los valores de emisiones de materia particulada y GEI se podrían llegar a reducir en gran medida e incluso hacerlos prácticamente nulos si se pudieran aumentar la eficiencia de producción de hidrógeno verde a través de la electrólisis del agua, permitiendo de esta manera producir hidrógeno limpio (sin ningún tipo de emisión de contaminantes). Se trata de una tecnología muy versátil que podría llegar a formar una tecnología híbrida combinándose con los vehículos eléctricos o incluso llegar a sustituir sus baterías por PEMFC.

Por otro lado, estaría la energía eléctrica, la cual nos muestra unos datos demasiado elevados. En primer lugar, aún hoy en día es difícil almacenar correctamente la energía eléctrica en un coche, pues esta se resiente en gran medida cuando se somete a vibraciones, lo que produce un alto consumo de energía comparada con las otras fuentes de energía y, en segundo lugar, la elevada cantidad de producción de energía eléctrica a través de fuentes de energía no renovables, dando lugar a una reducción de la calidad del aire. Se prevé que en unos años se reducirán las quemas y se optará por una mayor producción de electricidad a través de fuentes renovables como aerogeneradores o placas solares.

Los biocarburantes son una fuente de energía que aún está en desarrollo, pero con un gran potencial en la reducción de gases de efecto invernadero, en cambio, el uso de estos necesita una muy alta calidad en las materias primas utilizadas, aún sería necesarias investigaciones en el campo de la eficiencia energética. Otra de las grandes ventajas de los biocarburantes es que en pequeñas cantidades (<10%) no es necesario realizar ninguna modificación en el motor [10], precisamente por esta razón, son generalmente usados como un aditivo en la mezcla de combustible del automóvil, de esta manera se aprovecha su gran potencial de reducción de GEI sin necesidad de modificar el motor. Hay que ser muy cuidadosos y estrictos con el porcentaje de mezcla, porque si se excede, puede llegar a producir problemas en partes vitales del motor como pueden ser los pistones, la culata y los inyectores.

Actualmente, el rival a batir sigue siendo los combustibles fósiles porque han ido evolucionando a medida que pasaban los años y se iba modificando la legislación, de esta manera se iban reduciendo las emisiones producidas y mejorando las eficiencias de los motores. Debido a que son la fuente de energía más antigua usada en automóviles, ha tenido mucho más tiempo de desarrollo con respecto a las nuevas fuentes de energía alternativas, provocando así que los coches de combustibles fósiles sean los que mejor relación calidad/precio tienen. Pues este factor es el que de verdad va a marcar la diferencia de cara a un posible comprador. Como aspecto negativo tenemos las elevadas cifras de contaminación de la atmósfera a causa de la producción de los combustibles. Durante todo el tiempo que han sido utilizados, solo se ha descubierto una única forma de transformar el petróleo en fuente de energía y esta es a través de la quema.

En este análisis se han investigado los datos de cada fuente de energía por separado, pero esta es solo una opción, pues también han empezado a ser frecuentes las combinaciones de las fuentes de energía alternativas con los combustibles fósiles como por ejemplo los vehículos híbridos combinando combustibles fósiles y energía eléctrica, la combinación de combustibles fósiles y biocarburantes mencionada anteriormente. Incluso grandes marcas del sector automovilístico han llevado la combinación de combustibles fósiles y biocarburantes al extremo realizando las modificaciones pertinentes en el motor para que pueda funcionar no solo con un pequeño porcentaje de biocarburantes, sino que permite el funcionamiento del vehículo con un 100% de biocarburantes. Por el momento, esta nueva alternativa se ha llevado a cabo en vehículos diésel exclusivamente. Y últimamente se ha empezado a hablar también de una posible reconversión de los motores diésel convencionales a motores de hidrógeno para poder darles una segunda vida. Como se puede ver los distintos combustibles están en constante desarrollo, lo que hace que sea complicado decidir que combustible o combinación de ellos será el ganador en 2050, pues se esperan grandes cambios en los próximos 20-30 años [7,18].

7. BIBLIOGRAFÍA

1. Sobrino, F.H., Monroy, C.R., Pérez, J.L.H. (2011). Biofuels and fossil fuels: Life Cycle Analysis (LCA) optimisation through productive resources maximisation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 2621-2628.
2. Karl, T.R., Trenberth, K.E. (2003). Modern global climate change. *Science*, 302, 1719-1723.
3. University of Oxford. (2015). Global Challenges – Twelve risks that threaten human civilization. *Future of Humanity Institute, Oxford Martin School & Faculty of Philosophy*.
4. Zgurovsky, M. (2012). Sustainable Development Global Simulation: Analysis of Quality and Security of Human Life. *INTECH Publisher*.
5. Navarro, L. (2022, Marzo). *Radiografía del aumento del precio de la gasolina: un 16% más cara desde que estalló la guerra de Rusia contra Ucrania*. <https://www.newtral.es/aumento-precio-gasolina/20220309/>. Consultado el día 29 de Abril de 2022.
6. IEA. (2013). CO₂ emissions from fuel combustion. *Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris and Washington, DC*.
7. Kodjak, D., Sanchez, F.P., Segafredo, L. (2012). How Vehicle Standards and Fuel Fees Can Cut CO₂ and Boost the Economy. *The International Council on Clean Transportation (icct)*.
8. Hester, R., Harrison, R. (2014). Fracking. *Royal Society of Chemistry*.
9. Ziegler, A. (2012). Individual characteristics and stated preferences for alternative energy sources and propulsion technologies in vehicles: a discrete choice analysis for Germany. *Transportation research part A*, 46, 1372-1385.
10. Ugurlu, A., Oztuna, S. (2015). A comparative analysis study of alternative energy sources for automobiles. *International journal of hydrogen energy*, 40, 1178-11188.
11. IDAE. Combustibles y vehículos alternativos. *Treatise*.
12. Reyes, L. (2014, Noviembre). *La pila de combustible de hidrógeno está de moda pero, ¿sabes cómo funciona?* <https://www.autonocion.com/la-pila-de-combustible-de-hidrogeno-esta-de-moda-pero-sabes-como-funciona/>. Consultado el día 30 de Abril de 2022.
13. Puricelli, S., Cardellini, G., Casadei, S., Faedo, D., van den Oever, A.E.M., Grosso, M. (2021). A review on biofuels for light-duty vehicles in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
14. Del Campo, I., Pérez, R., Gil, J. (2021, Mayo). *Estado de desarrollo, mercado y potencial de los biocombustibles avanzados en España* [archivo PDF]. Recuperado de <https://www.cener.com/wp-content/uploads/2021/06/Articulo-CENER-en-INDUSTRIA-QUIMICA.pdf>. Consultado el día 5 de Mayo de 2022.
15. Torchio, M.F., Santarelli, M.G. (2010). Energy, environmental and economic comparison of different powertrain/fuel options using well-to-wheels assessment, energy and external costs–European market analysis. *Energy*, 35, 4156 -4171.
16. Gao, L., Winfield, Z.C. (2012). Life cycle assessment of environmental and economic impacts of advanced vehicles. *Energies*, 5, 605-620.

17. Lane, D.B. (2007). Life Cycle Assessment of Vehicle Fuels and Technologies. *London Borough of Camden*.
18. MacLean, H.L., Lave, L.B. (2003). Evaluating automobile fuel/propulsion system technologies. *Programme Energy Combustion*, 29, 1-69.
19. Messagie, M., Boureima, F-S., Coosemans, T., Macharis, C., Mierlo, J.V. (2014). A range-based vehicle life cycle assessment incorporating variability in the environmental assessment of different vehicle technologies and fuels. *Energies*, 7, 1467-1482.
20. Shen, W., Han, W., Chock, D., Chai, Q., Zhang, A. (2012). Well-to-wheels life-cycle analysis of alternative fuels and vehicle technologies in China. *Energy Policy*, 49, 296-307.
21. Consoli, F., Allen, D., Boustead, I.I. (1993). Guidelines for life cycle assessment: A code of practice. *SETAC*.
22. ISO. (1997). ISO 14040-Environmental management-Life cycle assessment-principles and framework, (pp.14).
23. Mohammadi Ashnani, H.M., Johari, A., Hashim, H., Hasani, E. (2014). Life Cycle Assessment of Palm Oil Biodiesel Production in Malaysia. *Applied Mechanics and Materials*, 465, 1080-1086.
24. Hekkert, M.P., Hendriks, F.H., Faaij, A.P., Neelis, M.L. (2005). Natural gas as an alternative to crude oil in automotive fuel chains well-to-wheel analysis and transition strategy development. *Energy Policy*, 33, 579-594.
25. Svensson, A.M., Møller-Holst, S., Glöckner, R., Maurstad, O. (2007). Well-to-wheel study of passenger vehicles in the Norwegian energy system. *Energy*, 32, 437-445.
26. Hossein, M., Miremadi, T., Johari, A., Danekar, A. (2015). Environmental impact of alternative fuels and vehicle technologies: A Life Cycle Assessment perspective. *Procedia Environmental Sciences*, 30, 205 – 210.
27. United Nations Environment Programme. (2021). *Why does air matter*. <https://www.unep.org/explore-topics/air/why-does-air-matter#:~:text=Air%20pollution%2C%20which%20kills%20an,of%20deaths%20from%20heart%20attack>. Consultado el día 17 de Abril de 2022.
28. World Health Organization. (2021). *Ambient (outdoor) air pollution*. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health). Consultado el día 20 de Abril de 2022.
29. Holmatov, B., Hoekstra, A.Y. (2019). The environmental footprint of transport by car using renewable energy. *Earth's Future*.
30. Prieto, A. (2020, Enero). *La entrega de par: Motores de combustión vs motores eléctricos ¿Quién gana y por qué?* <https://www.autonocion.com/motores-combustion-diesel-gasolina-vs-electricos-par/>. Consultado el día 2 de Mayo de 2022.
31. IMARTEC. (2014, Mayo). *¿Es realmente la biomasa neutra en emisiones de carbono?* <https://www.imartec.es/es-realmente-la-biomasa-neutra-en-emisiones-de-carbono/>. Consultado el día 20 de Mayo de 2022.
32. Rodríguez, M., Rivas-Pérez, R. (2017). Desarrollo de un sistema de control predictivo de la temperatura en un reactor de transesterificación. *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/320838906_Desarrollo_de_un_sistema_de

[control predictivo de la temperatura en un reactor de transesterificacion.](#)

Consultado el día 16 de Mayo de 2022.