

CÁTEDRA DE  
TRANSICIÓN  
ENERGÉTICA



UNIVERSIDAD  
POLITÉCNICA  
DE MADRID



PUBLICACIÓN:

*“COMPARANDO LA HUELLA DE CARBONO DE LAS ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS DEL TRANSPORTE PESADO POR CARRETERA”*

CÁTEDRA **FUNDACIÓN REPSOL** DE TRANSICIÓN  
ENERGÉTICA SOBRE MOVILIDAD SOSTENIBLE EN LA  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**Autora:** Carlota Navas, Estudiante del Máster en Ingeniería Industrial en la Universidad Politécnica de Madrid.

**Autor:** Javier Pérez, Profesor del Departamento de Ingeniería Química Industrial y del Medio Ambiente. Miembro del Grupo de Tecnologías Ambientales y Recursos Industriales.

## RESUMEN DE LA PUBLICACIÓN

### Comparando la huella de carbono de las alternativas tecnológicas del transporte pesado por carretera

Según la Agencia Internacional de la Energía, **el transporte rodado supone el 74% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero (GEI) a nivel mundial** en el año 2022. Estas emisiones incluyen movilidad de personas y mercancías, y los distintos modos de transporte: carretera, aéreo, marítimo, ferroviario y por tubería.

Dentro del transporte por carretera, el de mercancías supone el 31% de sus emisiones, alcanzando en 2022 su valor máximo histórico de emisión. En su evolución desde el año 2000, **las emisiones mundiales asociadas al transporte de mercancías en vehículos pesados se han incrementado un 56%**.

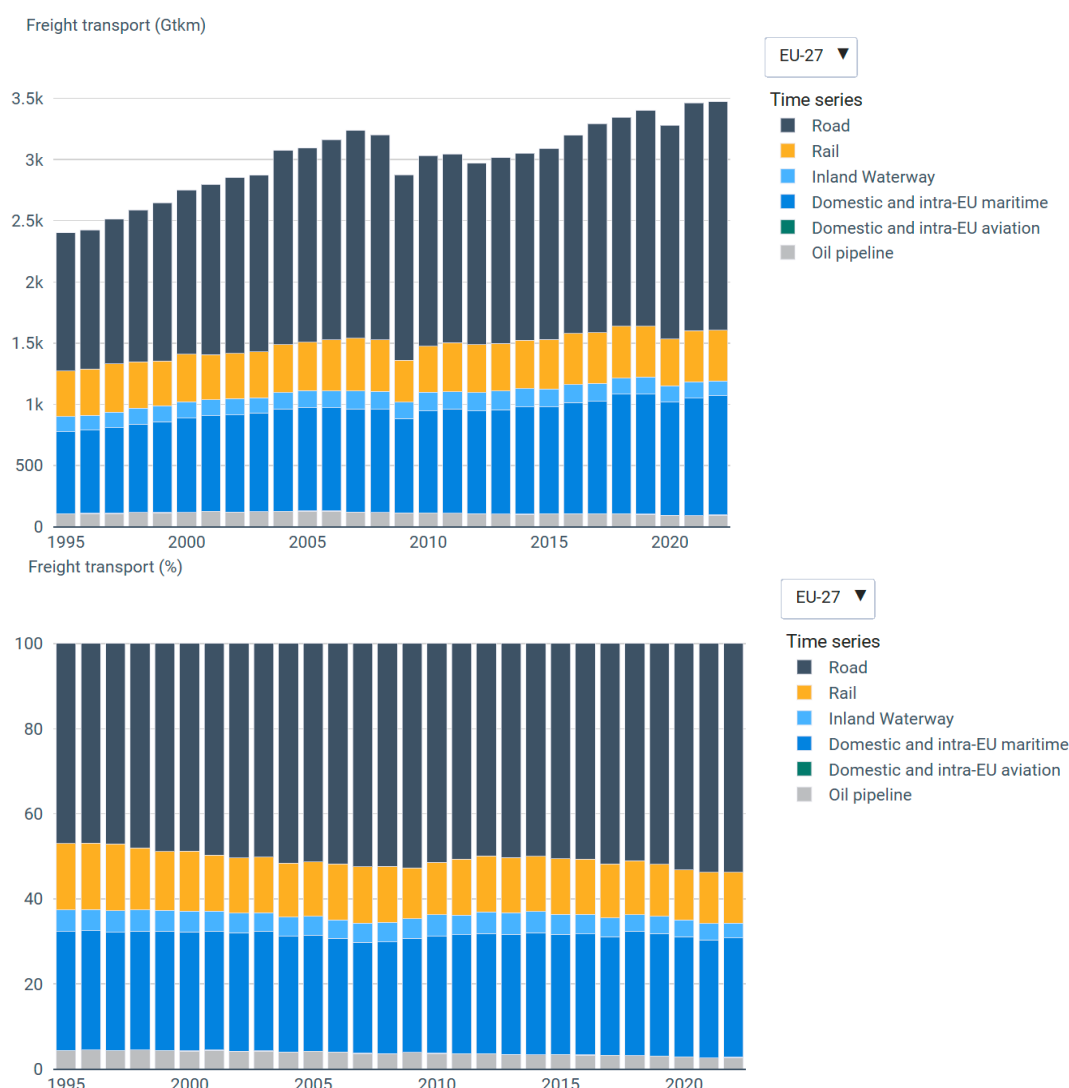
En la Unión Europea (UE) se ha alcanzado un valor histórico de emisión de GEI asociadas al transporte rodado de mercancías, habiendo experimentado la actividad del sector un crecimiento del 66% respecto a la situación del año 1995. **Este tipo de transporte supone el 54% del total del transporte de mercancías en la UE**, tal y como se recoge en la figura 1. Además, de acuerdo con las propias proyecciones realizadas por UE para el año 2030, **el transporte de mercancías crecerá un 9% y la vía terrestre llegará a copar un 68% de este transporte de bienes y productos**.

Dado el impacto ambiental asociado y las proyecciones existentes, reducir las emisiones de GEI de la movilidad de mercancías supone un desafío. El cumplimiento de los objetivos climáticos propuestos para el sector requiere de tres vías principales de actuación:

- **Reducir ineficiencias de la distribución de bienes y productos** (por ejemplo, minimizar viajes en vacío)
- **Emplear modos de transporte menos intensivos en emisiones de GEI**
- **Implementar medidas tecnológicas para la mitigación de las emisiones de GEI de camiones.**

En lo referente a este último conjunto de medidas, existen diferentes tecnologías y fuentes energéticas que pueden contribuir a reducir la huella de carbono de los vehículos pesados. **Estas tecnologías deben ser evaluadas en todo su ciclo de vida, no sólo durante la fase de uso del vehículo.**

Con el fin de evaluar esa huella de carbono, se ha llevado a cabo **una extensa revisión bibliográfica**, analizando más de 50 artículos científicos, publicados en los últimos 10 años. Se han recopilado datos de emisiones de GEI por tonelada\*kilómetro transportada, para un conjunto de tecnologías y fuentes energéticas, y para todo su ciclo de vida. Ya que las investigaciones analizadas han sido realizadas en diversos ámbitos geográficos/temporales, evaluando vehículos pesados con características y dimensiones específicas, la consideración de toda esa información ha supuesto un desafío debido a que: 1) las emisiones de los camiones muestran una gran variabilidad dependiendo del tipo/tamaño de camión, contexto geográfico/temporal, tipo de ruta (urbana/interurbana) y carga transportada; 2) no en todas las publicaciones se evalúa el ciclo de vida completo tanto de fuente energética como del propio vehículo; 3) las emisiones totales dependen de la ruta de obtención de la fuente energética y de la materia prima empleada para su obtención.



**Figura 1.** Evolución del transporte de mercancías por modo en la UE. Figura superior: datos globales expresados en toneladas\*kilómetro. Figura inferior: distribución porcentual por modo: terrestre, ferroviario, aéreo, marítimo y por tubería. Fuente: Comisión Europea

### Como principales conclusiones se tiene que:

- **gran variabilidad de la huella de carbono** dependiendo de la capacidad de carga del vehículo, el ámbito geográfico/temporal y el tipo de ruta/pauta de conducción
- predominio de la **fase de uso de la fuente energética** en las tecnologías de combustión interna (diésel y gas natural), procediendo la mayor parte de las emisiones de la fase de uso del combustible
- importancia condicionada de la fase de obtención de la fuente energética en las tecnologías híbridas, eléctricas y de celda de combustible, dependiente de la vía de obtención de la **energía empleada** (electricidad o hidrógeno). Así, generaciones eléctricas en base a

combustibles fósiles resulta en mayores emisiones de GEI, mientras que las que emplean fuentes renovables reducen este impacto ambiental

- relevancia cada vez mayor del impacto del **ciclo de vida del vehículo** (fabricación, mantenimiento y fin de vida) en las tecnologías de celda de combustible y eléctricas, llegando a contribuciones del 30-40%, dependiendo del tamaño de la batería
- importante papel la vida útil de baterías y de los propios camiones eléctricos e híbridos enchufables. Vehículos con ciclos de vida más largos distribuyen las emisiones de la fase de fabricación sobre más años de uso, reduciendo así su impacto ambiental. La **extensión de la vida útil de las baterías y su posible reciclaje/reutilización** serán fundamentales en la minimización de su impacto
- **emisiones nulas e incluso negativas de los biocombustibles**, debido a los procesos de absorción del CO<sub>2</sub> durante el crecimiento de las plantas utilizadas para producirlos y la posible generación de subproductos adicionales que puedan reemplazar la producción de otros materiales o energía
- en los camiones híbridos, el tipo de ruta (urbana o interurbana) tiene diferentes implicaciones sobre las emisiones asociadas a la fuente energética. Las rutas urbanas, con frecuentes paradas y arranques, permiten un mejor aprovechamiento del sistema de frenado regenerativo, pudiendo reducir así las emisiones totales. En contraste, en **rutas interurbanas** con velocidades altas y constantes, el motor de combustión interna es el predominante, lo que puede aumentar las emisiones en comparación con las rutas urbanas
- en el caso del hidrógeno, su impacto está determinado por su método de producción.

La transición hacia tecnologías de propulsión de bajas o nulas emisiones de GEI es esencial en la reducción de la huella de carbono del sector transporte. Sin duda, **las políticas públicas deben apoyar la investigación y desarrollo de tecnologías sostenibles y la infraestructura necesaria para su introducción masiva**. Algunas recomendaciones son: 1) implementación de incentivos para la compra de vehículos más sostenibles, desde el punto de vista ambiental; 2) desarrollo de infraestructura de carga/abastecimiento de electricidad/hidrógeno/combustibles renovables; 3) promoción de la economía circular en la industria automotriz, en pro del reciclaje y reutilización de componentes.

Una vez más, se pone de manifiesto la existencia de múltiples soluciones para la lucha contra el cambio climático y el análisis comparativo llevado a cabo entre diferentes tecnologías de propulsión revela que no existe una solución única para todos los contextos. Cada tecnología tiene ventajas y desventajas específicas según el tipo de uso, disponibilidad de infraestructura y estructura de producción/consumo de energía de cada región. Esto indica la necesidad de **una estrategia diversificada que combine varias tecnologías/fuentes energéticas para lograr la sostenibilidad ambiental (también económica y social) de la creciente movilidad terrestre de mercancías**.



POLITÉCNICA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid  
Tel.: 91 336 3060  
info.industriales@upm.es

[www.industriales.upm.es](http://www.industriales.upm.es)



Carlota Navas Ramallo

05 TRABAJO FIN DE MASTER

INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE MASTER

# EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LA HUELLA DE CARBONO EN TECNOLOGÍAS Y FUENTES ENERGÉTICAS PARA VEHÍCULOS PESADOS DE TRANSPORTE DE MERCANCÍAS

SEPTIEMBRE 2022

**Carlota Navas Ramallo**

DIRECTOR DEL TRABAJO FIN DE MASTER:

**Javier Pérez Rodríguez**



POLITÉCNICA

# TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

MÁSTER EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

## EVALUACIÓN COMPARATIVA DE LA HUELLA DE CARBONO EN TECNOLOGÍAS Y FUENTES ENERGÉTICAS PARA VEHÍCULOS PESADOS DE TRANSPORTE DE MERCANCÍAS

Autor

CARLOTA NAVAS RAMALLO

M22075

Tutor

JAVIER PÉREZ RODRÍGUEZ



POLITÉCNICA



INDUSTRIALES  
ETSII | UPM

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, agradezco profundamente a mi tutor de TFM, Javier Pérez Rodríguez, por su orientación experta, paciencia y apoyo continuo a lo largo de este proyecto. Sus consejos y conocimientos han sido fundamentales para alcanzar los objetivos planteados y para mi desarrollo académico y profesional.

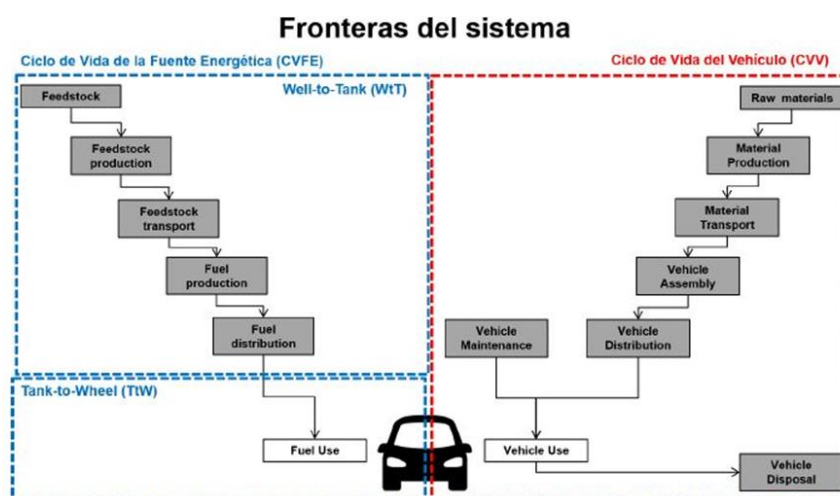
Asimismo, quiero reconocer y agradecer a la Cátedra Fundación Repsol en Transición Energética - Movilidad Sostenible de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid (ETSII-UPM). El respaldo y los recursos proporcionados por la Cátedra han sido clave para llevar a cabo esta investigación, enriqueciendo significativamente mi experiencia educativa.

Además, agradezco a mis familiares y amigos por su colaboración, apoyo y motivación durante todo el proceso. Sus contribuciones han sido invaluable y han hecho posible la culminación exitosa de este proyecto.

## RESUMEN

El presente Trabajo de Fin de Máster (TFM) tiene como objetivo realizar un análisis comparativo exhaustivo de la huella de carbono de diversas tecnologías de propulsión utilizadas en vehículos pesados. En el contexto actual de cambio climático, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) es crucial, y el sector del transporte representa una de las fuentes más significativas de estas emisiones. Este estudio se enfoca en proporcionar una evaluación integral y actualizada del impacto ambiental de diferentes tecnologías, incluyendo motores diésel, vehículos eléctricos (BEV), híbridos (HEV), híbridos enchufables (PHEV) y de hidrógeno (FCEV). El objetivo principal es proporcionar una visión integral del impacto ambiental de estas tecnologías para guiar la toma de decisiones hacia una movilidad más sostenible.

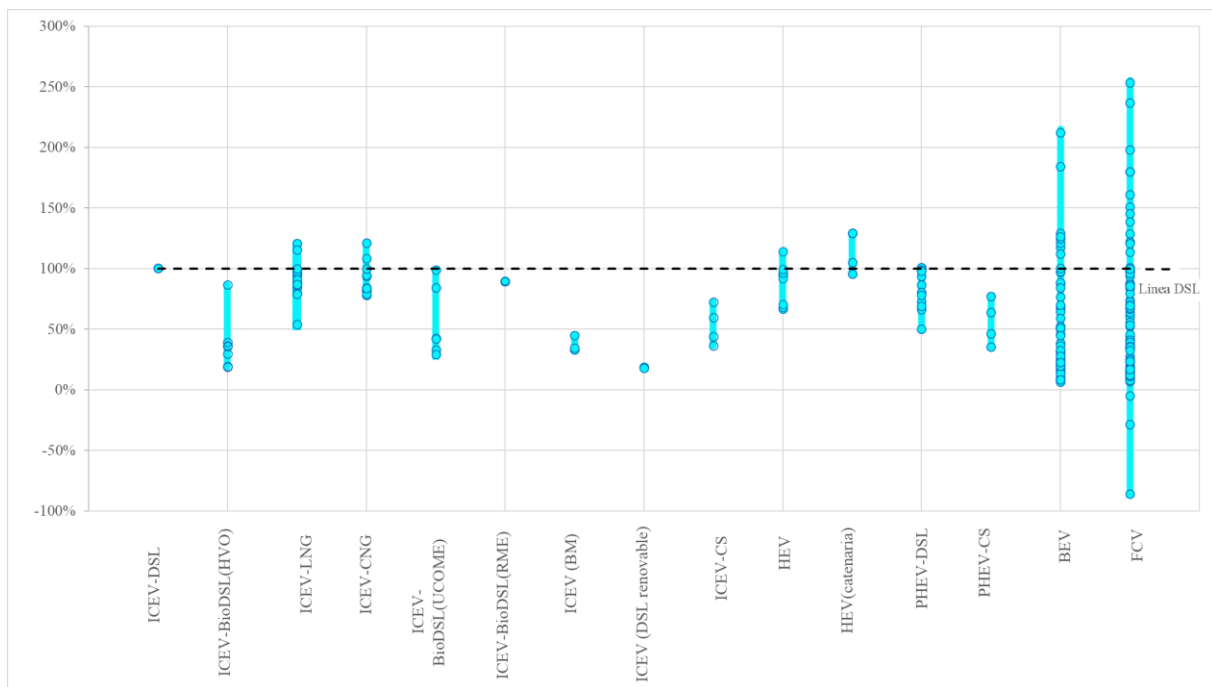
El análisis se basa en la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV), que permite evaluar el impacto ambiental del ciclo de vida de la fuente energética (CVFE) y del ciclo de vida del vehículo (CVV) tal y como se muestra en la **Figura 1**. En cuanto al CVFE, se consideran todas las etapas desde la producción, transformación y distribución, hasta el uso del combustible en el vehículo. Este ciclo, conocido como “del pozo a la rueda” (Well to Wheel, WTW), se divide en dos fases: “del pozo al tanque” (Well to Tank, WTT) y “del tanque a la rueda” (Tank to Wheel, TTW). La primera fase incluye las emisiones generadas en la obtención, transformación y distribución del combustible, mientras que la segunda contabiliza las emisiones de GEI producidas durante el uso del vehículo. Las fuentes energéticas evaluadas incluyen combustibles convencionales, biocombustibles, gas natural comprimido (GNC o CNG) y licuado (GNL o LNG), combustibles sintéticos, hidrógeno y electricidad.



**Figura 1.** Ciclo de vida del vehículo y de la fuente energética. Fuente: Pérez et al. (2017)



Para realizar el análisis del impacto de ciclo de vida de las diferentes tecnologías, se ha realizado una revisión bibliográfica de más de 50 artículos recopilando datos que emplearan la unidad funcional g CO<sub>2</sub> eq/tkm, que representan los g de CO<sub>2</sub> emitidos al transportar 1 tonelada de carga durante 1 kilómetro. Debido a que las investigaciones analizadas han sido realizadas en diversos ámbitos geográficos y condicionantes temporales, evaluando vehículos pesados con características y dimensiones específicas, se presentan desafíos significativos en el análisis del impacto ambiental. Por esta razón, se ha llevado a cabo una comparación relativa, donde el impacto del diésel representa el 100%.



**Figura 2.** Comparación relativa de las emisiones de GEI durante todo el ciclo de vida de todas las tecnologías de propulsión estudiadas frente al diésel. Fuente: Elaboración propia a partir de las referencias de la **Tabla 4** y la **Tabla 11**

La **Figura 2** presenta el impacto total respecto al diésel de cada una de las tecnologías de propulsión estudiadas, en términos relativos. Las principales conclusiones del análisis indican que los combustibles fósiles como el LNG y el CNG ofrecen una ligera mejora de aproximadamente un 10% en comparación con el diésel, aunque sus ventajas pueden verse limitadas por desventajas en la combustión y posibles fugas de metano.

Los biocombustibles, incluyendo aceite vegetal hidrogenado (HVO), éster metílico de aceite de cocina usado (UCOME) y éster metílico de aceite de colza (RME), muestran reducciones significativas en las emisiones de GEI ya que el CO<sub>2</sub> liberado es equivalente al carbono

absorbido por las plantas durante su crecimiento. Por ello sus emisiones en la fase WTT se pueden considerar neutras o incluso negativas en el caso que durante el proceso de producción se generen subproductos que sustituyan procesos más intensivos en carbono, reduciendo así las emisiones globales de GEI.

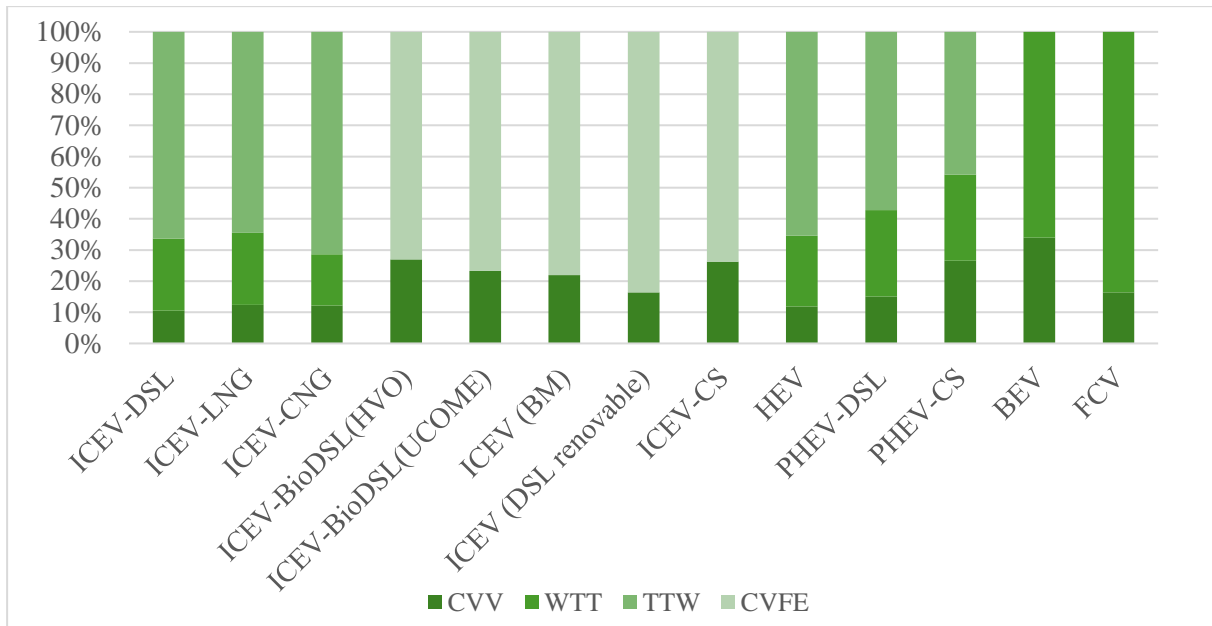
Los combustibles sintéticos, pueden reducir las emisiones entre un 44 y un 60% respecto al diésel, dependiendo de las políticas climáticas aplicadas. El biometano y el diésel renovable también presentan importantes reducciones de CO<sub>2</sub> equivalente, con rangos de 33-44% y 17-19%, respectivamente.

Los HEV tienen emisiones que varían entre un 67 y 114%. La variabilidad depende principalmente de si se utiliza en rutas urbanas o interurbanas, ya que esto influye en el nivel de uso de la batería. Los PHEV muestran un rango de 50-100%, influenciado por el mix energético usado para cargar las baterías.

Los BEV presentan un rango de emisiones entre un 7-212% en comparación con el diésel, destacando la importancia de un mix energético de generación eléctrica baja o libre de emisiones.

Finalmente, los FCEV tienen un rango de emisiones muy amplio, de -86 a 253%, dependiendo del método de producción del hidrógeno, con posibilidades de lograr emisiones negativas si se utiliza biomasa con captura y almacenamiento de carbono (CCS).

Otro objetivo de este análisis es determinar cuánto contribuyen las fases CVV, WTT y TWW a las emisiones totales. En la **Figura 3** se presentan los resultados obtenidos de la búsqueda bibliográfica realizada.



**Figura 3.** Contribución de las fases CVV, WTT y TTW respecto al impacto total para las tecnologías de propulsión estudiadas. Fuente: Elaboración propia a partir de la **Tabla 12**, la **Tabla 13** y la **Tabla 14**

Las principales conclusiones que se extraen son :

- **CVV:** aunque menos dominante, la fase CVV es relevante en todas las tecnologías, especialmente en tecnologías avanzadas como BEV y FCEV, debido a los procesos de producción de vehículos más complejos y materiales especializados.
- **WTT:** tiene una importancia creciente en las tecnologías eléctricas e híbridas, especialmente en BEV y FCEV, donde el suministro de energía (eléctrica o hidrógeno) impacta significativamente en las emisiones totales dependiendo de cómo se lleva a cabo esa generación de electricidad.
- **TTW:** es la fase predominante en las tecnologías de combustión interna (diésel, LNG, CNG), lo que indica que la mayor parte de las emisiones proviene del uso del combustible durante la operación del vehículo. Por otro lado, en las tecnologías BEV y FCEV esta fase se considera neutra/sin emisiones.
- **Biocombustibles:** la fase CVFE es la principal fuente de emisiones, representando entre el 70 y el 80% del impacto total, mientras que la fase CVV tiene una contribución menor, aunque con una mayor importancia relativa en comparación con el diésel.

La transición hacia tecnologías de propulsión de bajas o nulas emisiones es esencial para reducir la huella de carbono del sector transporte. Las políticas públicas deben apoyar la investigación y desarrollo de tecnologías sostenibles y la infraestructura necesaria para su adopción masiva. Las recomendaciones específicas incluyen:

- Implementación de incentivos fiscales y subvenciones para la compra de vehículos más sostenibles, desde el punto de vista ambiental.
- Desarrollo de infraestructura de carga y abastecimiento de hidrógeno.
- Promoción de la economía circular en la industria automotriz, facilitando el reciclaje y reutilización de componentes.

Este trabajo proporciona una base sólida para la toma de decisiones informadas, promoviendo una movilidad más sostenible y contribuyendo a la reducción de emisiones de GEI en el sector del transporte rodado de mercancías.

**Palabras Clave:** análisis de ciclo de vida, cambio climático, combustibles alternativos, efecto invernadero, emisiones, huella de carbono, sostenibilidad, tecnologías de propulsión, vehículos pesados.

### **Códigos UNESCO**

250902 Contaminación Atmosférica

330801 Control de la Contaminación Atmosférica

330804 Ingeniería de la Contaminación

331702 Automóviles

# CONTENIDO

RESUMEN.....	ii
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Antecedentes .....	1
1.2. Cambio climático .....	2
1.3. El papel del transporte pesado.....	5
1.4. Gases de efecto invernadero.....	9
1.5. Huella de carbono.....	12
1.6. Análisis de Ciclo de Vida (ACV).....	14
1.6.1 Definición de objetivo y alcance.....	15
1.6.2 Inventario de ciclo de vida .....	16
1.6.3 Evaluación de impactos ambientales de ciclo de vida .....	16
1.6.4 Interpretación de los resultados.....	18
2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO .....	19
3. METODOLOGÍA .....	20
4. RESULTADOS.....	24
4.1. Ciclo de vida del vehículo (CVV).....	26
4.1.1. Revisión bibliográfica .....	26
4.1.2. Impacto de cada uno de los elementos en la producción de un vehículo pesado	34
4.2. Fase del pozo al tanque (WTT) .....	36
4.2.1. Revisión bibliográfica .....	37
4.2.2. Análisis del informe JEC.....	49
4.3. Fase del tanque a la rueda (TTW) .....	51
4.3.1 Revisión bibliográfica .....	51
4.3.2 Análisis del informe JEC.....	57
4.4. Ciclo de vida completo de la fuente energética (WTW).....	60
4.4.1. Análisis del JEC .....	60
4.5. Análisis del ciclo de vida completo.....	66
4.5.1. Revisión bibliográfica .....	66
4.6. Contribución de las diferentes fases respecto a las emisiones totales.....	71
4.6.1. Contribución de la fase CVV respecto a las emisiones totales .....	72

4.6.2.	Contribución de la fase WTT respecto a las emisiones totales .....	74
4.6.3.	Contribución de la fase TTW respecto a las emisiones totales .....	75
4.6.4.	Contribución de la fase WTW respecto a las emisiones totales.....	78
4.6.5.	Contribución de todas las fases respecto a las emisiones totales .....	80
5.	CONCLUSIONES .....	83
6.	LÍNEAS FUTURAS .....	87
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	88
8.	PLANIFICACIÓN TEMPORAL Y PRESUPUESTO.....	94
8.1.	Estructura de descomposición del proyecto (EDP).....	94
8.2.	Diagrama de Gantt .....	95
8.3.	Presupuesto.....	97
9.	EVALUACIÓN DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES, SOCIALES Y ECONÓMICOS DEL PROYECTO .....	100
10.	ANÁLISIS DE LOS ASPECTOS LEGALES Y ÉTICOS PERTINENTES A SU ELABORACIÓN Y/O APLICACIÓN .....	102
11.	CONTRIBUCIÓN A LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE.....	104
12.	ÍNDICE DE FIGURAS .....	106
13.	ÍNDICE DE TABLAS .....	109
14.	ABREVIATURAS, UNIDADES Y ACRÓNIMOS.....	110
15.	GLOSARIO.....	114

# 1. INTRODUCCIÓN

La industria del transporte es una de las principales contribuyentes a las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI), representando una amenaza significativa para la sostenibilidad ambiental. En particular, los vehículos pesados juegan un papel crucial debido a su alta demanda energética y su impacto significativo en la calidad del aire. Ante esta problemática, el desarrollo de tecnologías de propulsión menos emisoras y eficientes se ha convertido en una prioridad para reducir las emisiones y mitigar los efectos del cambio climático.

Este trabajo de fin de máster (TFM) se enfoca en el análisis comparativo del impacto ambiental de diversas tecnologías de propulsión de vehículos pesados a través del análisis de ciclo de vida (ACV). El ACV es una metodología estandarizada internacionalmente (normas ISO 14040 y 14044) que permite evaluar de manera integral las cargas ambientales asociadas con todas las etapas del ciclo de vida de un producto, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final.

El objetivo principal de este estudio es determinar y comparar la huella de carbono de diferentes tecnologías de vehículos pesados, incluyendo aquellas basadas en combustibles fósiles y en energías alternativas. Para ello, se han considerado las siguientes fases del ciclo de vida: desde la producción y ensamblaje del vehículo (CVV), pasando por la generación y transporte del combustible (WTT), hasta su uso en operaciones diarias (TTW).

La relevancia de este TFM radica en proporcionar una base científica sólida para la toma de decisiones en políticas públicas y estrategias empresariales orientadas a la sostenibilidad en el sector del transporte. A través de una revisión exhaustiva de la literatura y la recopilación de datos empíricos, se pretende identificar las tecnologías de propulsión más eficientes y menos contaminantes, promoviendo así un cambio hacia un transporte más ecológico.

En los siguientes capítulos, se detallan los métodos utilizados, los resultados obtenidos y las conclusiones derivadas del análisis, ofreciendo una visión completa y crítica sobre el impacto ambiental de las tecnologías de propulsión de vehículos pesados.

## 1.1. Antecedentes

En el marco de las actividades llevadas a cabo por la Cátedra de la Fundación Repsol de Transición Energética en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la

Universidad Politécnica de Madrid (ETSII-UPM), se ha impulsado un enfoque multidisciplinario para abordar los desafíos ambientales y tecnológicos del sector del transporte. La creación del Observatorio de Movilidad Sostenible refleja el compromiso de la ETSII-UPM y Repsol en la búsqueda de soluciones innovadoras y sostenibles para mejorar la eficiencia energética y reducir el impacto ambiental del transporte.

Para el curso académico 2023-2024, la Cátedra Repsol de Transición Energética ha lanzado una convocatoria de cuatro Becas de Colaboración, destinadas a estudiantes de la ETSII-UPM para desarrollar actividades relacionadas con la cátedra y la realización de su TFM. Estas becas se distribuyen en cuatro áreas temáticas específicas, cada una de ellas coordinada por un profesor especializado de la escuela:

- A) Tecnologías para la descarbonización del transporte por carretera y sus impactos ambientales.
  - Coordinador: Javier Pérez Rodríguez
- B) Análisis del impacto de la movilidad autónoma, conectada, cooperativa y compartida en ámbitos urbanos e interurbanos.
  - Coordinador: Felipe Jiménez Alonso
- C) Tecnologías para la descarbonización del transporte aéreo y sus impactos ambientales.
  - Coordinador: Gustavo Alonso Rodrigo
- D) Tecnologías para la reducción de emisiones de gases contaminantes del transporte marítimo y sus impactos ambientales.
  - Coordinador: Fernando Marcos Duque

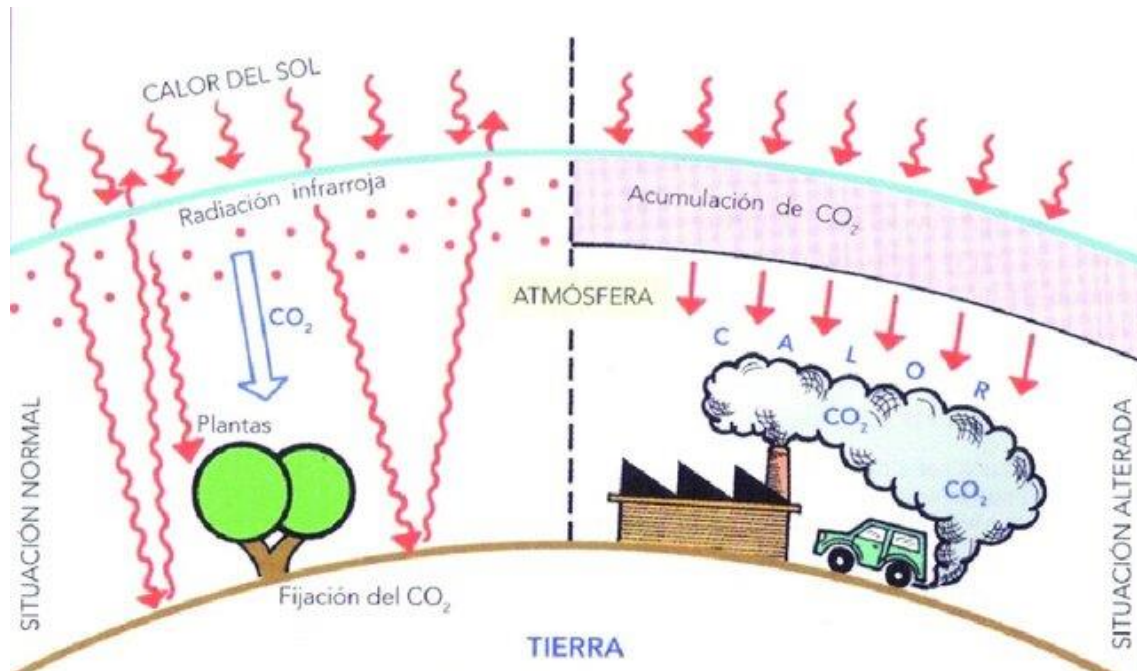
Este TFM se enmarca en la primera área temática, bajo la coordinación del profesor Javier Pérez Rodríguez. El objetivo es llevar a cabo un análisis exhaustivo del impacto ambiental de los vehículos pesados a lo largo de su ciclo de vida, empleando la metodología de ACV para evaluar y comparar diferentes tecnologías de propulsión.

## **1.2. Cambio climático**

El cambio climático es un fenómeno que implica transformaciones a largo plazo en las temperaturas y los patrones climáticos. Aunque estos cambios pueden producirse de forma natural debido a variaciones en la actividad solar o grandes erupciones volcánicas, desde el siglo XIX, las actividades humanas han sido el principal impulsor del cambio climático. La



quemado de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural ha generado emisiones a la atmósfera de GEI, especialmente dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y metano ( $\text{CH}_4$ ), que absorben el calor en la atmósfera que la superficie terrestre devuelve fruto de la radiación solar, aumentando las temperaturas globales tal y como muestra la **Figura 4**.



**Figura 4.** Diagrama explicativo del efecto invernadero. Fuente: Vásquez Tarazona (2014)

Los científicos han confirmado que la actividad humana ha provocado un calentamiento global acelerado en los últimos 200 años. Actualmente, la temperatura media de la Tierra es  $1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  más alta que a finales del siglo XIX, un incremento sin precedentes en los últimos 100.000 años. La última década (2011-2020) ha sido la más cálida registrada, y cada una de las últimas cuatro décadas ha sido más cálida que cualquier otra desde 1850.

El cambio climático no solo implica un aumento de las temperaturas; también altera el sistema climático global, generando una serie de consecuencias adversas. Entre los impactos más graves se encuentran sequías prolongadas, escasez de agua, incendios forestales, elevación del nivel del mar, inundaciones, deshielo polar, tormentas severas y pérdida de biodiversidad. Estos cambios tienen repercusiones directas sobre la salud humana, la producción de alimentos, la vivienda, la seguridad y el empleo.

El cambio climático se manifiesta de manera particular en distintas regiones del mundo. En España, según el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO, 2021), se han identificado las siguientes tendencias:

1. Los veranos se han alargado notablemente, extendiéndose casi cinco semanas más desde la década de 1970, según la AEMET.
2. Los caudales medios de los ríos han disminuido, con algunos registros que muestran reducciones de más del 20% en las últimas décadas.
3. El clima semiárido se ha expandido, con más de 30.000 km<sup>2</sup> de nuevos territorios semiáridos en solo unas pocas décadas.
4. Las olas de calor son cada vez más frecuentes, duraderas e intensas.

Las comunidades más vulnerables, como las de las pequeñas naciones insulares y los países en desarrollo, son las más afectadas por estos cambios. Por ejemplo, el aumento del nivel del mar y la intrusión de agua salada han obligado a algunas comunidades a reubicarse, mientras que las sequías prolongadas están aumentando el riesgo de hambrunas. Se prevé que el número de "refugiados climáticos" aumente en el futuro.

Para evitar los peores efectos del cambio climático y mantener un clima habitable, es crucial limitar el aumento de la temperatura global a no más de 1,5 °C. La COP21, que tuvo lugar en París en 2015, representó un momento histórico al lograr un importante acuerdo global con tres objetivos principales:

- Limitar el incremento de la temperatura global a menos de 2°C, con esfuerzos adicionales para restringirlo a 1,5°C.
- Mejorar la capacidad de adaptación frente a los efectos negativos del cambio climático, impulsando un desarrollo con bajas emisiones de GEI.
- Redirigir los flujos financieros hacia un desarrollo resistente al clima y con bajas emisiones

No obstante, las políticas actuales podrían llevarnos a un aumento de 2,8 °C para finales de siglo. Aunque todos los países emiten GEI, algunos son responsables de una mayor proporción. En 2020, los siete mayores emisores (China, Estados Unidos, India, la Unión Europea, Indonesia, Rusia y Brasil) fueron responsables de la mitad de las emisiones globales.

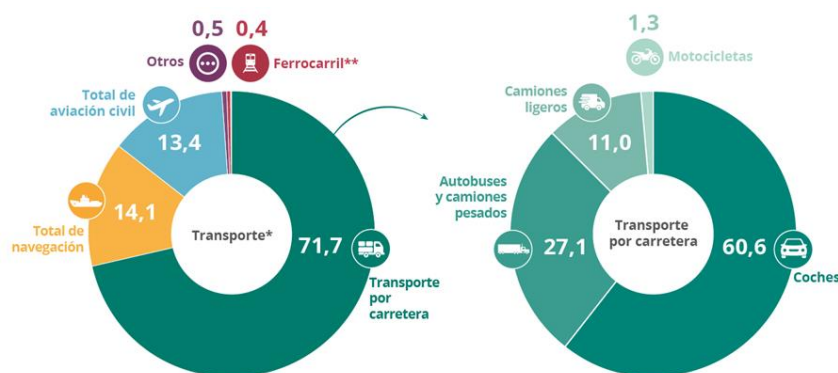
A pesar de la magnitud del desafío, existen soluciones conocidas para abordar el cambio climático. Estas soluciones incluyen la reducción de emisiones, la adaptación a los impactos

climáticos y la financiación de las medidas necesarias. La transición de los combustibles fósiles a energías renovables como la solar y la eólica es esencial. Es necesario que se realicen recortes significativos en las emisiones antes de 2030 para mantener el calentamiento por debajo de 1,5 °C.

### 1.3. El papel del transporte pesado

El transporte de mercancías pesadas por carretera es esencial para la economía global, facilitando el movimiento de bienes y materiales a lo largo de vastas distancias. Sin embargo, esta actividad es una de las principales fuentes de emisiones de GEI y otros contaminantes atmosféricos, contribuyendo significativamente al cambio climático y a la contaminación atmosférica.

El sector del transporte según la Comisión Europea CE (2023) es responsable de una quinta parte de las emisiones de GEI de la Unión Europea (UE) y es la principal causa de contaminación atmosférica en las ciudades. Dentro de este sector, los vehículos pesados como camiones y autobuses representan más del 27,1% de las emisiones de GEI del transporte por carretera en la UE tal y como se puede observar en la **Figura 5** y aproximadamente el 6% del total de emisiones de GEI de la UE. A pesar de los esfuerzos para reducir estas emisiones, el transporte es el único sector de la UE donde las emisiones han seguido aumentando en los últimos años debido a la creciente demanda de transporte por carretera, con un incremento del 33,5% entre 1990 y 2019.



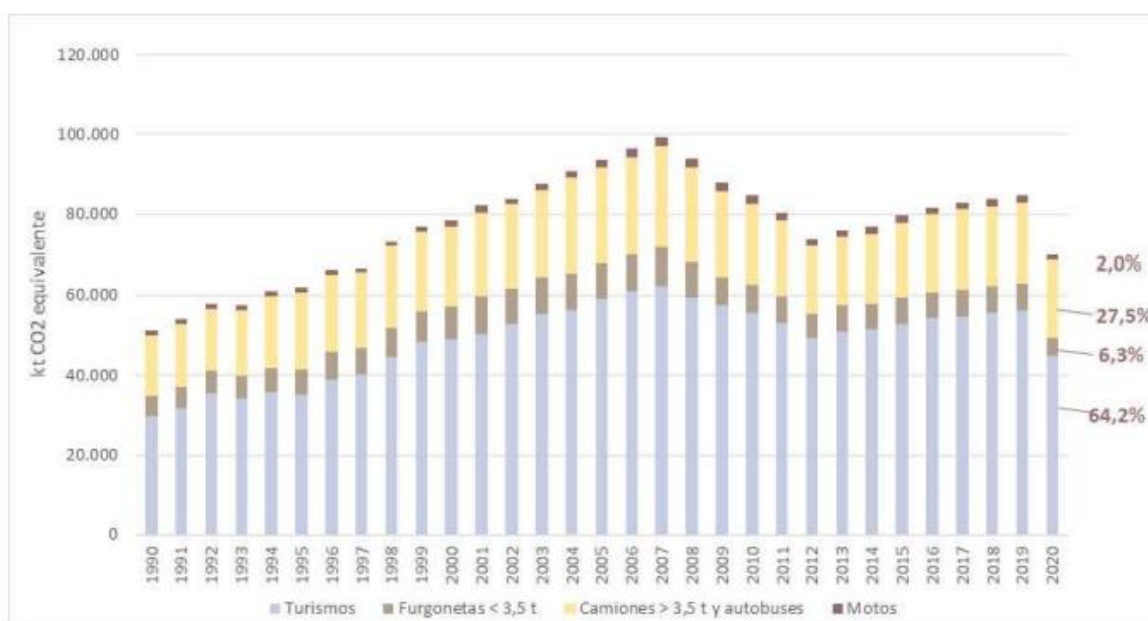
**Figura 5.** Emisiones de GEI procedentes del transporte en la UE. Fuente: Agencia Europea de Medio Ambiente (2023)

En España concretamente, según el último informe del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana MITMA (2023), el transporte por carretera es el mayor contribuyente a las

emisiones de GEI del sector transporte, representando un promedio del 91,2% del total entre 1990 y 2020. Esta cifras, aunque alta, es ligeramente inferior a las de otros países europeos como Italia, Francia, y Alemania, debido a que España tiene una mayor proporción de emisiones provenientes de la aviación y la navegación marítima. En el año 2022 las emisiones del transporte excluyendo la tubería fueron de 90,46 Mt CO<sub>2</sub> eq.

Las emisiones del transporte por carretera en España aumentaron un 93,6% entre 1990 y 2007, impulsadas principalmente por el crecimiento del parque vehicular y el aumento del número de kilómetros recorridos. Después de la crisis financiera, estas emisiones disminuyeron, pero a partir de 2014 volvieron a crecer a una tasa media anual del 2,0% hasta 2019. Sin embargo, entre 2019 y 2020, se observó una reducción del 17,4% en las emisiones, atribuida en gran medida a la pandemia de COVID-19 (MITMA, 2023).

Las emisiones del transporte por carretera en función del tipo de vehículo revelan que, desde 1990, las emisiones de los vehículos ligeros han aumentado un 88,9%, mientras que las de motocicletas crecieron un 75,3%. En contraste, las emisiones de furgonetas, camiones y autobuses solo aumentaron un 30,1% en conjunto tal y como se observa en la **Figura 6**.



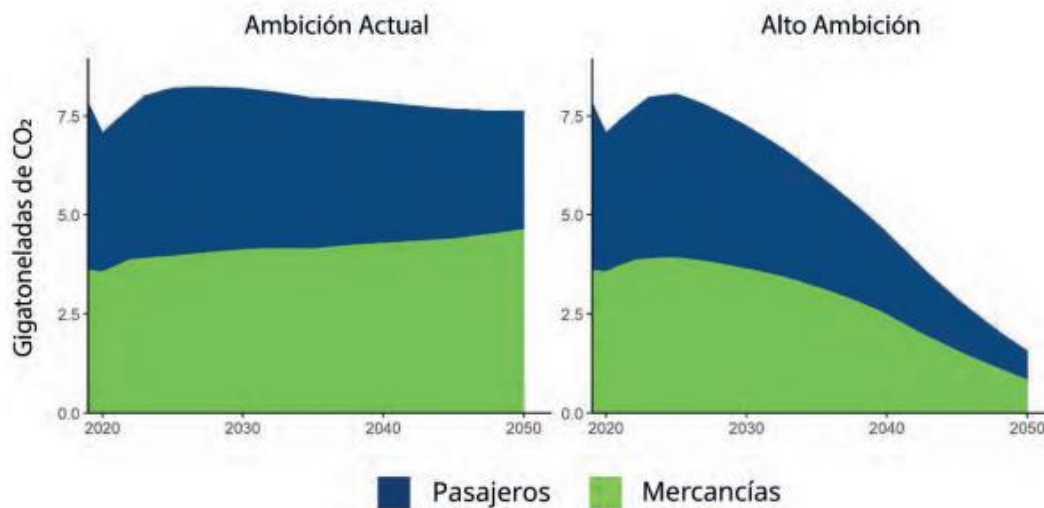
**Figura 6.** Evolución de las emisiones de GEI del transporte por carretera en función del tipo de vehículo. Años 1990-2020. Fuente: MITMA (2023)

Dada la alta participación del transporte en la producción de emisiones de GEI, la descarbonización de este sector es crucial para alcanzar los objetivos de neutralidad climática

para 2050. Las políticas europeas y nacionales se han centrado en reducir estas emisiones mediante la implementación de normas más estrictas de CO<sub>2</sub> para vehículos pesados a partir de 2030, con el fin de mejorar la calidad del aire y cumplir con los compromisos de neutralidad climática de la UE (MITMA, 2023).

En el informe realizado por la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico), *Perspectivas del Transporte ITF (“International Transport Forum”) 2023* (OCDE, 2023), se analizan dos escenarios clave para evaluar los impactos del transporte. El primer escenario, denominado *Ambición Actual*, reconoce la necesidad urgente de descarbonizar el sector del transporte, considerando las políticas actuales y los próximos compromisos políticos a nivel nacional y regional. Este escenario refleja la realidad de que muchos planes de descarbonización avanzan lentamente. El segundo escenario, denominado *Alta Ambición*, toma como base las políticas del escenario de *Ambición Actual*, pero con plazos de implementación acelerados y objetivos más ambiciosos. Este escenario proyecta una mayor urgencia y escala en las medidas políticas y tecnológicas para lograr una transición más rápida hacia un transporte sostenible.

Como se muestra en la **Figura 7**, en 2019 las emisiones del transporte se dividieron casi equitativamente entre el transporte de pasajeros (54%) y el transporte de mercancías (46%). Sin embargo, estos dos sectores se descarbonizan a ritmos diferentes. Para 2030, ambos sectores contribuirán de manera similar a las emisiones de CO<sub>2</sub> del transporte. Sin embargo, para 2050, bajo el escenario de *Ambición Actual*, se prevé que las emisiones del transporte de mercancías superarán los niveles de 2019, alcanzando un 61% del total, mientras que el transporte de pasajeros mostrará una reducción significativa en sus emisiones. Incluso en el escenario de *Alta Ambición*, aunque las emisiones totales se reducirían notablemente, las del transporte de mercancías seguirían representando una mayor proporción en comparación con las del transporte de pasajeros. Este análisis resalta la necesidad urgente de desarrollar y aplicar políticas eficaces y ambiciosas para la transición hacia sistemas de transporte pesado más ecológicos y sostenibles.



**Figura 7.** Emisiones del transporte de pasajeros y mercancías en los escenarios de Ambición Actual y de Alta Ambición, 2019-2050. Fuente: OCDE (2023)

Tal y como se ha mencionado, la descarbonización del sector de transporte de mercancías por carretera es una medida inminente y necesaria. Por ello en este documento se van a analizar las emisiones las principales tecnologías de propulsión que se emplean en los vehículos pesados entre las cuales se encuentran :

- **Motores de combustión interna (ICEV):** utiliza un motor de combustión interna que quema combustibles fósiles (como gasolina o diésel, principalmente) para generar energía mecánica. El combustible se mezcla con aire, se comprime y se enciende mediante una chispa (en motores de gasolina) o por compresión (en motores diésel), produciendo una explosión que mueve los pistones y genera movimiento.
- **Tecnología híbrida (HEV):** combina un motor de combustión interna (ICE) con uno o más motores eléctricos. La batería del motor eléctrico se recarga mediante el propio motor de combustión, frenado regenerativo y la energía capturada al desacelerar. El sistema gestiona automáticamente el uso del motor eléctrico o el motor de combustión, o ambos, para optimizar la eficiencia del combustible.
- **Tecnología híbrida enchufable (PHEV):** similar a un HEV, pero con una batería más grande que puede recargarse enchufándola a una fuente de energía externa. Puede funcionar en modo eléctrico puro para distancias cortas y utiliza el motor de

combustión para trayectos más largos o cuando la batería se agota. Ofrece mayor autonomía eléctrica que un HEV convencional.

- **Tecnología eléctrica de batería (BEV):** funciona únicamente con electricidad almacenada en una batería grande. Los BEV utilizan uno o más motores eléctricos para propulsar el vehículo. La batería se recarga enchufando el vehículo a una fuente de energía externa. No emite gases de escape y tiene una autonomía limitada por la capacidad de la batería.
- **Tecnología eléctrica de celda de combustible (FCEV):** utiliza hidrógeno almacenado en tanques a bordo que reacciona con oxígeno en una celda de combustible para producir electricidad. Esta electricidad se utiliza para alimentar un motor eléctrico que propulsa el vehículo. Los FCEV solo emiten vapor de agua como subproducto y tienen una autonomía similar a los vehículos convencionales de combustión interna.

## 1.4. Gases de efecto invernadero

Los gases presentes en la atmósfera actúan de manera similar al cristal de un invernadero: retienen parte del calor que la Tierra devuelve al espacio en forma de radiación infrarroja e impiden que se disipe en el espacio, lo que provoca el calentamiento global. Este fenómeno, conocido como efecto invernadero, eleva la temperatura de la superficie terrestre más de lo que sería sin estos gases, permitiendo así la vida en el planeta. Aunque muchos GEI son naturales, las actividades humanas incrementan su concentración, intensificando el calentamiento global. Esto altera los patrones de nieve y lluvia, eleva las temperaturas medias y aumenta la frecuencia de fenómenos climáticos extremos como olas de calor e inundaciones (Parlamento Europeo, 2023).

Los principales GEI incluyen el CO<sub>2</sub>, el CH<sub>4</sub> y el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), que están presentes de forma natural pero también son generados por actividades humanas. Además, los gases fluorados, como los hidrofluorocarburos (HFC), perfluorocarburos (PFC), hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>) y trifluoruro de nitrógeno (NF<sub>3</sub>), son los más potentes y persistentes, con un efecto invernadero miles de veces superior al CO<sub>2</sub>. Aunque estos gases no dañan la capa de ozono, se utilizan frecuentemente como sustitutos de sustancias que sí lo hacen. El Protocolo de Kioto y el Acuerdo de París, que coordinan la respuesta global al cambio climático, incluyen estos siete GEI en sus regulaciones :

- **Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)**

El CO<sub>2</sub> es generado de manera natural por los animales durante la respiración y a través de la descomposición de la biomasa. También ingresa a la atmósfera mediante la quema de combustibles fósiles y reacciones químicas. Durante la fotosíntesis, las plantas lo eliminan de la atmósfera, convirtiendo la luz solar en energía. Por lo tanto, los bosques juegan un papel crucial en la captura de carbono.

- **Metano (CH<sub>4</sub>)**

El metano es un gas incoloro que constituye el principal componente del gas natural. Sus emisiones provienen de la producción y transporte de carbón, gas natural y petróleo, así como de la ganadería, prácticas agrícolas, uso del suelo y descomposición de residuos orgánicos en vertederos. En 2021, la mayor parte de las emisiones de metano fueron resultado de la agricultura, la silvicultura y la pesca.

- **Óxido nitroso (N<sub>2</sub>O)**

Este gas se produce a partir de la acción microbiana en el suelo, el uso de fertilizantes nitrogenados, la quema de madera y la producción química. Se emite en actividades agrícolas e industriales, así como en el uso del suelo, la combustión de combustibles fósiles y residuos sólidos, y el tratamiento de aguas residuales. En la UE, la agricultura, la silvicultura y la pesca fueron responsables de la mayoría de las emisiones de N<sub>2</sub>O en 2021.

- **Hidrofluorocarburos (HFC)**

Los hidrofluorocarbonos representan aproximadamente el 90% de las emisiones de gases fluorados. La UE trabaja para eliminarlos progresivamente antes de 2050. Se utilizan principalmente en frigoríficos, congeladores, aparatos de aire acondicionado, bombas de calor, spray para el asma, aerosoles técnicos, agentes espumantes y extintores. En 2021, fueron predominantes en los sectores de comercio al por mayor y al por menor, y en la reparación de vehículos de motor y motocicletas.

- **Perfluorocarburos (PFC)**

Los perfluorocarbonos son compuestos sintéticos usados comúnmente en procesos de fabricación industrial.

- **Hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>)**



El hexafluoruro de azufre se emplea principalmente para el aislamiento de líneas eléctricas.

- **Trifluoruro de nitrógeno (NF<sub>3</sub>)**

El trifluoruro de nitrógeno se utiliza como "gas de limpieza de cámaras" en la fabricación de microprocesadores y circuitos para eliminar acumulaciones no deseadas en las piezas durante su producción.

Cada uno de estos gases tiene una duración diferente en la atmósfera y un índice de potencial de calentamiento global ("GWP", Global warming potential), que mide su capacidad para calentar la Tierra en comparación con el CO<sub>2</sub>. Por ello para poder compararlos suelen convertirse en CO<sub>2</sub> equivalente. En la **Tabla 1**, se presenta tanto el GWP, como la vida útil atmosférica que se refiere al tiempo promedio que una molécula de ese gas permanece en la atmósfera antes de ser eliminada por procesos químicos o físicos naturales. Esta medida es crucial porque determina cuánto tiempo un gas puede influir en el efecto invernadero y, por lo tanto, en el calentamiento global. Los datos se han obtenido del sexto informe de evaluación del IPCC (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático) realizado en el año 2023 que proporciona datos sobre los GWP de diversos GEI y los va actualizando a medida que aparece nueva información.

**Tabla 1.** Potencial de calentamiento global y vida útil atmosférica. Fuente: IPCC (2023)

<b>GASES DE EFECTO INVERNADERO</b>	<b>ÍNDICE GWP (100 AÑOS)</b>	<b>VIDA ÚTIL ATMOSFÉRICA (AÑOS)</b>
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	1	100-300
Metano (CH <sub>4</sub> )	27,99	11,8
Óxido nitroso (N <sub>2</sub> O)	273	109
Hidrofluorocarburos (HFC)	1.360	14
Perfluorocarburos (PFC)	6.630	50.000
Hexafluoruro de azufre (SF <sub>6</sub> )	25.600	3.200
Tricloruro de nitrógeno (NF <sub>3</sub> )	17.500	500

El CO<sub>2</sub>e es una medida que se usa para expresar el impacto de las emisiones de diferentes GEI en términos de la cantidad de CO<sub>2</sub> que tendría el mismo efecto sobre el calentamiento global. Esto se calcula utilizando el GWP de cada gas.

Para calcular el CO<sub>2</sub>e de una cantidad específica de un gas de efecto invernadero, se multiplica la cantidad emitida por el GWP del gas. Por ejemplo, si se emiten 1 tonelada de CH<sub>4</sub> y el GWP del metano es 27,99 según la **Tabla 1**, entonces el CO<sub>2</sub>e de esa tonelada de metano sería 27,99 toneladas de CO<sub>2</sub>e.

El CO<sub>2</sub>e permite comparar el impacto climático de diferentes GEI en una única medida. Esto facilita la evaluación de las políticas de mitigación y la planificación de estrategias de reducción de emisiones. Muchos marcos regulatorios y acuerdos internacionales, como el Protocolo de Kioto y el Acuerdo de París, utilizan el CO<sub>2</sub>e para establecer límites de emisiones y objetivos de reducción. Esto asegura que se consideren todos los GEI de manera equitativa y se enfoquen los esfuerzos en reducir aquellos con mayor impacto.

### 1.5. Huella de carbono

Según la definición establecida en la norma ISO 14067, la huella de carbono de un producto se refiere a la cantidad total de emisiones de GEI asociadas a dicho producto a lo largo de su ciclo de vida. Esto abarca desde la extracción de materias primas, el procesamiento, la fabricación, la distribución, el uso del producto, hasta su disposición final, ya sea mediante depósito, reutilización o reciclaje.

Según la guía para el cálculo de la huella de carbono realizada por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO, 2024), para calcular la huella de carbono, se utiliza la **Ecuación 1**:

$$\text{Ecuación 1: Huella de carbono} = \text{Dato de actividad} \times \text{Factor de emisión}$$

Donde:

- **Dato de actividad:** representa el nivel de la actividad que genera emisiones de GEI. Por ejemplo, la cantidad de gas natural consumido para calefacción, medido en kWh<sub>PCS</sub> de gas natural.
- **Factor de emisión (FE):** indica la cantidad de GEI emitidos por cada unidad del parámetro "dato de actividad". Este factor varía según la actividad específica. Por ejemplo, para el consumo de gas natural para calefacción en 2023, el factor de emisión sería 0,182 kg CO<sub>2</sub> eq/kWh<sub>PCS</sub> de gas natural.

Aplicando esta fórmula, se obtiene la cantidad de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub> eq), expresada en unidades como gramos, kilogramos o toneladas.

La guía MITECO (2024) indica que las principales normas y metodologías de mayor reconocimiento internacional para calcular la huella de carbono son las siguientes :

- **Greenhouse Gas Protocol Corporate Standard (GHG Protocol):** desarrollado por el *World Resources Institute* y el *World Business Council for Sustainable Development*, este protocolo es ampliamente utilizado a nivel internacional para cuantificar y gestionar las emisiones de GEI. Proporciona un marco integral para medir y gestionar las emisiones de una organización.
- **UNE-EN ISO 14064-1:** basada en el *GHG Protocol*, la norma ISO 14064, publicada en 2006, se divide en tres partes. La parte 14064-1 especifica los principios y requisitos para la cuantificación y el informe de emisiones y remociones de GEI a nivel organizacional. La 14064-2 se centra en proyectos diseñados para reducir emisiones o aumentar remociones, y la 14064-3 aborda la validación y verificación de GEI declarados.
- **UNE-EN ISO 14065: 2021:** establece los requisitos para los organismos que realizan la validación y verificación de gases de efecto invernadero, para su uso en acreditación u otros reconocimientos oficiales.
- **UNE-ISO/TR 14069: 2015:** proporciona una guía para la cuantificación e informe de GEI para organizaciones, facilitando la aplicación de la norma ISO 14064-1.
- **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories:** una guía detallada para calcular las emisiones de GEI de diversas fuentes y sectores, que incluye una lista de factores de emisión. Útil tanto para inventarios nacionales como para calcular la huella de carbono de organizaciones, con factores de emisión genéricos en caso de no disponer de específicos. En 2019 se publicó una actualización: *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines*.
- **Bilan Carbone (Francia):** desarrollado por la Agencia Francesa del Medio Ambiente y Gestión de la Energía, esta herramienta metodológica, implementada desde 2004, mide las emisiones de GEI basándose en el *GHG Protocol* y la ISO 14064.
- **Indicadores GRI (Global Reporting Initiative):** iniciativa internacional que involucra a diversas entidades, incluyendo empresas y gobiernos, para establecer un marco común global. Proporciona un lenguaje uniforme y parámetros comunes para comunicar cuestiones de sostenibilidad a través de memorias de sostenibilidad, que incluyen indicadores de desempeño económico, ambiental y social.

- **Recomendación de la Comisión de 9 de abril de 2013 (2013/179/UE):** promueve el uso de métodos comunes para medir y comunicar el comportamiento ambiental de productos y organizaciones a lo largo de su ciclo de vida.
- **ISAE 3410:** norma internacional aprobada por el Consejo de Normas Internacionales de Auditoría y Aseguramiento (IAASB) en 2012, se centra en los contratos de aseguramiento de informes de gases de efecto invernadero.

## 1.6. Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

El ACV es una metodología utilizada para evaluar los impactos ambientales asociados con todas las etapas de la vida de un producto, proceso o servicio. Este enfoque integral permite identificar y cuantificar los efectos ambientales desde la extracción de materias primas hasta la disposición final del producto, pasando por su fabricación, distribución, uso y fin de vida útil.

El ACV persigue varios objetivos clave que contribuyen a la sostenibilidad y mejora ambiental de productos y procesos. En primer lugar, permite la comparación de productos funcionalmente equivalentes, como en el caso de los envases, ayudando a identificar la opción más sostenible. Además, es crucial para el desarrollo y diseño de nuevos productos, como los productos químicos, optimizando su perfil medioambiental. También apoya la mejora de productos y procesos existentes mediante la adopción de mejores técnicas disponibles (MTD o BAT). El ACV es una herramienta valiosa para la planificación empresarial y la toma de decisiones estratégicas, ayudando a posicionar productos en mercados objetivo-específicos. Asimismo, facilita el desarrollo de criterios para la asignación de ecoetiquetas, como las reguladas por el Reglamento (CE) 66/2010 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de noviembre de 2009. También permite comparar el impacto ambiental de productos de diferentes empresas, mejorando su posicionamiento en el mercado. A nivel gubernamental, el ACV apoya el desarrollo de políticas ambientales, proporcionando una base sólida para la gestión de sectores como la agricultura, ganadería, agua y residuos. Por último, el ACV es fundamental para la información, comunicación y educación pública, incrementando la conciencia ambiental sobre los productos de consumo.

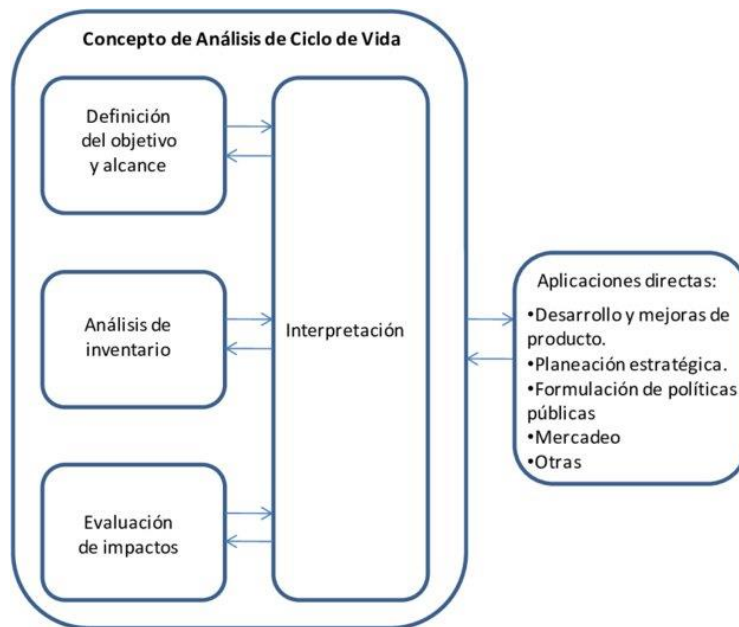
La principal normativa aplicable es :

- ISO 14040:2006. Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia. Traslada a la normativa española por la norma UNE EN ISO 14040

- ISO 14044:2006. Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requerimientos y directrices. Traducida a la normativa española por la norma UNE-EN ISO 14044

Las etapas principales del ACV las cuales se encuentran representadas en la **Figura 8** son :

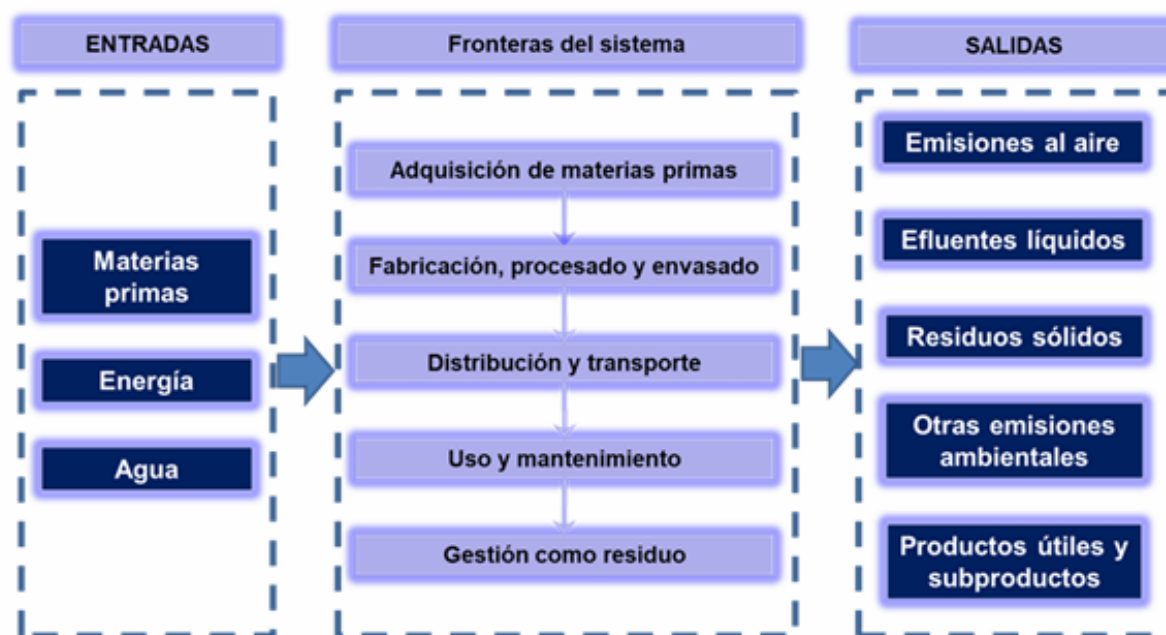
- 1- Definición de objetivo y alcance
- 2- Inventario de ciclo de vida
- 3- Evaluación de impactos ambientales del ciclo de vida
- 4- Interpretación de los resultados



**Figura 8.** Las cuatro fases principales de un ACV según la norma ISO 14040. Fuente: Zah et al. (2012)

### 1.6.1 Definición de objetivo y alcance

Esta fase inicial establece claramente el propósito del estudio y el alcance del análisis. Incluye la identificación de las razones para realizar el ACV, los límites del sistema (qué procesos y etapas del ciclo de vida se incluirán) como por ejemplo los representados en la **Figura 9** y la unidad funcional, que es la referencia a la cual se normalizarán los resultados (por ejemplo, un kilogramo de producto). Esta fase también considera las suposiciones y limitaciones de la investigación, así como el público objetivo del análisis.



**Figura 9.** Límites de un sistema estudiado mediante el ACV. Fuente: Apuntes del curso de Ecología Industrial (2023)

## 1.6.2 Inventario de ciclo de vida

En esta etapa, se recopilan datos sobre todas las entradas y salidas del sistema estudiado, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final. Esto incluye el uso de recursos naturales, energía, emisiones al aire, agua y suelo, y otros residuos generados. Los datos se organizan en un inventario que proporciona una base cuantitativa para la evaluación de los impactos ambientales.

## 1.6.3 Evaluación de impactos ambientales de ciclo de vida

Esta fase traduce los datos del inventario en impactos ambientales potenciales. Se clasifican y caracterizan las emisiones y consumos de recursos en categorías de impacto específicas, como el cambio climático, la acidificación, la eutrofización, la toxicidad humana, entre otras. En la **Tabla 2** se encuentran las principales categorías de impacto con una breve descripción según la metodología EICV (Evaluación de impacto de ciclo de vida) *Environmental Footprint* recomendada por la Comisión Europea. Cada categoría tiene factores de caracterización que permiten cuantificar el impacto relativo de cada flujo de material o energía.

**Tabla 2.** Categorías de impacto según la metodología EICV *Environmental Footprint*. Fuente: Elaboración propia

<b>Categoría de Impacto</b>	<b>Descripción</b>
Cambio climático	Emisiones de GEI que contribuyen al calentamiento global, medido en CO <sub>2</sub> equivalente.
Destrucción de la capa de ozono estratosférico	Emisiones de sustancias que agotan la capa de ozono estratosférico, como los CFCs, medido en CFC-11 equivalente.
Toxicidad humana- efectos no carcinogénicos	Impacto de sustancias tóxicas que no causan cáncer en la salud humana.
Toxicidad humana- efectos carcinogénicos	Impacto de sustancias tóxicas que causan cáncer en la salud humana.
Material particulado (efectos respiratorios)	Emisiones de partículas que afectan la salud respiratoria humana.
Radiación ionizante (efectos sobre la salud humana)	Exposición a radiación ionizante que afecta la salud humana.
Formación de ozono troposférico (oxidantes fotoquímicos)	Emisiones de precursores del ozono troposférico que contribuyen a la formación de smog fotoquímico.
Acidificación	Emisiones de gases como el SO <sub>2</sub> y NO <sub>x</sub> que causan la acidificación del suelo y cuerpos de agua.
Eutrofización terrestre	Exceso de nutrientes en suelos que provoca el crecimiento excesivo de plantas y altera los ecosistemas terrestres.
Eutrofización del agua dulce	Exceso de nutrientes en cuerpos de agua dulce que provoca el crecimiento excesivo de algas y plantas acuáticas.
Eutrofización del agua marina	Exceso de nutrientes en cuerpos de agua marina que provoca el crecimiento excesivo de algas y plantas acuáticas.
Ecotoxicidad	Impacto tóxico de sustancias químicas en organismos acuáticos y terrestres.
Uso del suelo	Superficie terrestre utilizada y alterada a lo largo del ciclo de vida del producto o servicio.
Agotamiento de los recursos hídricos	Cantidad de agua consumida a lo largo del ciclo de vida del producto o servicio.
Agotamiento de los recursos minerales y metálicos	Consumo de minerales y metales que son esenciales para diversas aplicaciones industriales.
Agotamiento de los recursos fósiles	Consumo de combustibles fósiles como el petróleo, carbón y gas natural.

#### **1.6.4 Interpretación de los resultados**

La fase final implica analizar los resultados del inventario y la evaluación de impactos para extraer conclusiones y formular recomendaciones. Esto incluye identificar áreas críticas y oportunidades para la mejora ambiental, así como evaluar la fiabilidad y limitaciones de los resultados. La interpretación debe ser coherente con los objetivos y alcance definidos inicialmente, y puede incluir propuestas para la optimización de productos o procesos, estrategias de mitigación y comunicación de resultados a las partes interesadas.

El ACV es una herramienta útil para evaluar los impactos ambientales de productos y procesos, pero tiene varias limitaciones. La recolección de datos puede ser compleja y costosa, a menudo resultando en datos incompletos o no representativos. Las suposiciones y estimaciones necesarias introducen incertidumbres, y los modelos utilizados pueden no reflejar todas las complejidades del mundo real. Además, el ACV puede carecer de contexto local y no capturar adecuadamente los impactos ambientales regionales. Tradicionalmente, se enfoca en impactos ambientales y puede no considerar los efectos sociales y económicos. La falta de estandarización y comparabilidad de métodos puede dificultar la interpretación de resultados, y en industrias con rápida evolución tecnológica, los resultados del ACV pueden volverse rápidamente obsoletos.



## 2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

El objetivo de este estudio es realizar una exhaustiva revisión bibliográfica de los artículos científicos más recientes para llevar a cabo un análisis comparativo de la huella de carbono de las diversas tecnologías de propulsión utilizadas en vehículos pesados. A través de esta revisión, se busca proporcionar una evaluación integral y actualizada de cómo cada tecnología de propulsión afecta al medio ambiente en términos de emisiones de carbono. Este análisis comparativo permitirá identificar las fortalezas y debilidades de cada tecnología en relación con su impacto ambiental, lo que a su vez podría ayudar a informar las decisiones en la selección de tecnologías más sostenibles en el sector de vehículos pesados.

De forma más específica, este trabajo tiene las siguientes metas:

1. Recopilar y examinar una amplia gama de artículos científicos que aborden la evaluación de la huella de carbono en vehículos pesados, centrándose en diversas tecnologías de propulsión, como motores diésel, vehículos eléctricos, híbridos, de hidrógeno, entre otros.
2. Analizar y sintetizar los datos y conclusiones proporcionados por los estudios seleccionados, con el fin de comparar los impactos ambientales asociados a cada tecnología de propulsión en términos de emisiones de carbono.
3. Identificar tendencias, patrones y discrepancias significativas entre los estudios revisados, con el objetivo de ofrecer una visión clara y objetiva sobre la eficiencia ambiental relativa de las tecnologías de propulsión analizadas.
4. Proporcionar información valiosa que pueda orientar a los tomadores de decisiones en la selección de tecnologías de propulsión más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente dentro del sector de transporte de carga

Esta investigación se estructura según la normativa ISO 14067, asegurando la consistencia y calidad en la evaluación de la huella de carbono

Existen varias metodologías para calcular la huella de carbono, cada una con diferentes alcances y etapas, lo que puede resultar en interpretaciones dispares. Para aportar claridad y estandarizar resultados, este estudio, en colaboración con la Cátedra Fundación Repsol en Transición Energética - Movilidad Sostenible de la ETSII-UPM, busca unificar criterios. Esto permite comparaciones consistentes y facilita la comprensión de cómo diferentes enfoques pueden influir en las conclusiones.

## 3. METODOLOGÍA

La metodología empleada para la elaboración del presente trabajo se ha estructurado en cuatro bloques principales, de acuerdo con el plan de trabajo inicialmente aprobado. A continuación, se detalla cada bloque y las tareas acometidas en cada uno de ellos:

### 1. Bloque I: introducción, definición de objetivos, y fundamentos conceptuales

#### Tareas acometidas:

- Familiarización con metodologías y normativas:
  - Estudio de la metodología de ACV conforme a las normas ISO 14040 y 14044.
  - Particularización del ACV para el cálculo de la huella de carbono según la norma ISO 14067.
- Definición del problema de investigación:
  - Formulación clara de los objetivos del estudio.
  - Justificación y relevancia del estudio en el contexto de la sostenibilidad y reducción de emisiones.
  - Definición de la huella de carbono del vehículo y de las fronteras del sistema
- Delimitación del alcance de la investigación:
  - Definición de la huella de carbono del vehículo y las fronteras del sistema.
  - Desglose del ciclo de vida del vehículo en sus diferentes etapas: CVV, WTT y TTW

### 2. Bloque II : revisión de la literatura

#### Tareas acometidas:

- Búsqueda y selección de estudios relevantes:
  - Recolección de estudios previos sobre el impacto del ciclo de vida de diferentes tecnologías de vehículos pesados.
- Análisis crítico de la literatura:
  - Evaluación crítica de la metodología y resultados de estudios anteriores.
- Identificación de brechas en la investigación:

- Determinación de las lagunas existentes en la investigación actual.
- Resumen y síntesis de metodologías y resultados:
  - Resumen de las metodologías utilizadas en estudios anteriores y sus principales hallazgos.

### **3. Bloque III: recopilación y análisis de datos (dividido en las fases CVV, WTT, TTW)**

#### Tareas acometidas:

#### **3.1. Fase CVV (ciclo de vida del vehículo):**

- Recolección y análisis de datos:
  - Identificación y recopilación de datos de emisión sobre la producción, ensamblaje y fin de vida de vehículos de diversas tecnologías de propulsión.
  - Uso de herramientas específicas de ACV, como el Modelo GREET.
- Evaluación de contribuciones y condicionantes:
  - Evaluación de las principales contribuciones ambientales de cada tipología de vehículo.
  - Análisis de factores geográficos, tipo de vehículo, condiciones de carga y tipo de trayectoria.
- Armonización de resultados:
  - Representación de las emisiones en términos relativos frente al diésel.

#### **3.2. Fase WTT (“Well-to-Tank”, del pozo a la rueda)**

- Recolección y evaluación de datos:
  - Obtención de datos de emisiones sobre la extracción, producción y transporte de combustibles.
  - Estudio de los principales factores que influyen en las emisiones en esta fase.
- Análisis de condicionantes:
  - Evaluación de factores geográficos, tipo de vehículo, condiciones de carga y tipo de trayectoria.
- Herramientas y software utilizados:

- Uso de herramientas específicas de ACV (Modelo GREET, Estudio JEC, Calculadora VOLVO, etc.).
- Armonización de resultados:
  - Representación de las emisiones en términos relativos frente al diésel.

### **3.3. Fase TTW (“Tank to Wheel”, del tanque a la rueda)**

- Recogida y evaluación de datos:
  - Obtención y evaluación de datos de emisiones durante el uso del vehículo.
- Herramientas y software utilizados:
  - Uso de herramientas específicas de ACV (Modelo GREET, Estudio JEC, etc.).
- Armonización de resultados:
  - Representación de las emisiones en términos relativos frente al diésel.
- Análisis de condicionantes:
  - Evaluación de los condicionantes temporales y geográficos que pueden influir en los resultados.

## **4. Bloque IV : Interpretación de resultados y conclusiones**

### Tareas acometidas

- Análisis de resultados:
  - Evaluación detallada de los resultados obtenidos en las fases CVV, WTT y TTW.
  - Realización de un análisis integral de la fase WTW para determinar el impacto total.
- Comparación de tecnologías:
  - Comparación de los impactos ambientales entre las diferentes tecnologías de vehículos.
- Discusión y formulación de conclusiones:
  - Discusión de los resultados en el contexto de la literatura revisada.
  - Formulación de conclusiones basadas en los hallazgos del estudio.
- Recomendaciones y reflexiones:
  - Propuestas de recomendaciones para la industria o futuras investigaciones.
  - Reflexión sobre las limitaciones del estudio y posibles mejoras.
- Elaboración del informe final:

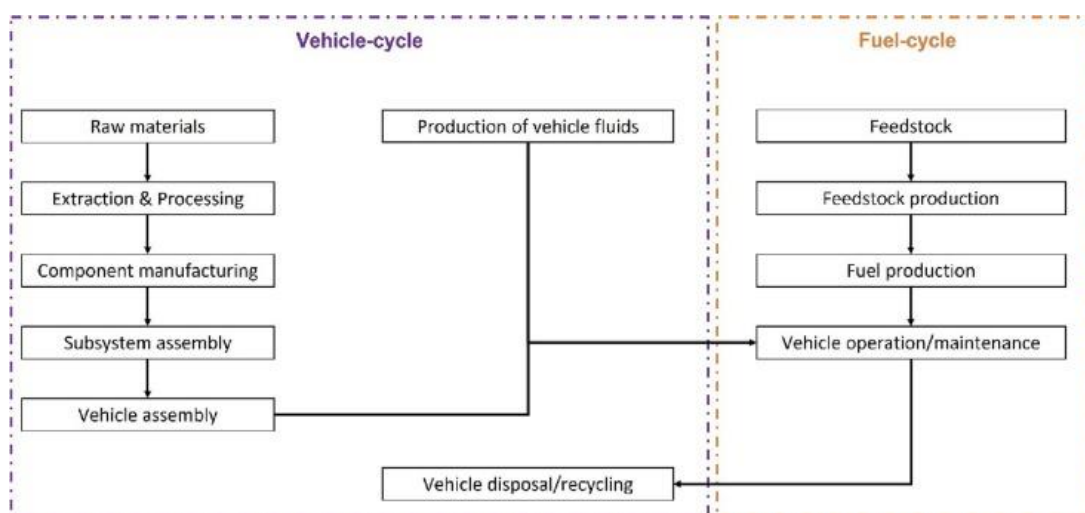
- Redacción y presentación del informe final del TFM.

Esta metodología proporciona una estructura clara y detallada para llevar a cabo el estudio de manera organizada y efectiva, asegurando que cada etapa del proceso esté bien definida y alineada con los objetivos de la investigación.

## 4. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos durante la rigurosa revisión bibliográfica realizada sobre las emisiones de GEI generadas por el sector del transporte de mercancías. La comparación se ha llevado a cabo utilizando la unidad funcional de g CO<sub>2</sub> eq/tkm, que representa los gramos de CO<sub>2</sub> emitidos al transportar una tonelada de carga durante 1 kilómetro. Este enfoque permite una comparación relativa entre los diferentes artículos, a pesar de las posibles diferencias en los modelos de vehículos pesados estudiados.

El alcance de la investigación abarca todo el ciclo de vida del vehículo pesado, lo cual incluye el CVV y el CVFE. Tal y como se puede observar en la **Figura 10**, el CVV incluye la extracción de la materia prima y su procesamiento, la fabricación de sus componentes, el ensamblaje final del vehículo, la producción y uso de los fluidos del vehículo usados para mantener el vehículo durante su vida y el final de la vida del vehículo cuyo acrónimo en inglés es EOL (“End of life”) el cual incluye el desecho del vehículo y su reciclaje (Iyer et al., 2023). Por otro lado, el CVFE también conocido en inglés como “Well to Wheel” (WTW) está compuesto por dos fases. La primera fase es la conocida como WTT, la cual incluye los procesos de producción, transporte, fabricación y distribución de la fuente energética. Contiene todas las etapas, desde la extracción, captura o cultivo del portador de energía primaria hasta el suministro de combustible a los vehículos (EC, 2020). Finalmente, la fase TTW incluye las emisiones de GEI en el escape del vehículo debido a la combustión de combustible.



**Figura 10.** Fases que incluye el ciclo de vida del vehículo y el ciclo de vida de la fuente energética.  
Fuente: Iyer et al. (2023)

La **Tabla 3**, muestra las tecnologías de propulsión y las fuentes energéticas que se han considerado tanto para el estudio del CVV como para el CVFE.

**Tabla 3.** Fuentes energéticas consideradas para cada una de las fuentes de propulsión consideradas. Fuente: Elaboración propia

TECNOLOGÍA DE PROPULSIÓN	FUENTE ENERGÉTICA
Vehículo de combustión interna (ICEV)	Diésel
	Biodiésel-Aceite vegetal hidrogenado (HVO)
	Gas natural licuado (LNG)
	Gas natural comprimido (CNG)
	Biodiésel-Éster metílico de aceite de cocina usado (UCOME)
	Biodiésel-Éster metílico de aceite de colza (RME)
	Biometano
	Diésel renovable
	Combustibles sintéticos (CS)
Vehículo híbrido (HEV)	Diésel + electricidad
Vehículo híbrido por catenaria	Diésel + electricidad
Vehículo híbrido enchufable (PHEV)	Diésel + electricidad
	Combustible sintético + electricidad
Vehículo eléctrico (BEV)	Electricidad
Vehículo de celda de combustible (FCEV)	Hidrógeno (H <sub>2</sub> )

Además de los múltiples artículos que se han revisado durante la búsqueda bibliográfica, otras referencias básicas que se han empleado son :

- El estudio europeo realizado para el ciclo de vida del combustible por JRC (*the Joint Research Centre of the European Commission*), junto con EUCAR (*European Council for Automotive Research and development*) y CONCAWE (*European oil companies' association for environment, health and safety in refining and distribution*) también conocido como JEC (EC, 2020)

- El modelo estadounidense llamado GREET (*The Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Technologies*) que analiza tanto el CVV como el CVFE y ha sido desarrollado por Argonne National Laboratory's Systems Assessment Center del Departamento de Energía de Estados Unidos (Argonne National Laboratory's Systems Assessment Center (ANL), 2020)

En las próximas secciones se presentan los resultados recopilados para cada fase de manera individual, comparando las diferentes tecnologías y fuentes energéticas consideradas. Posteriormente, se realiza un análisis del impacto total del ciclo de vida para cada sistema de propulsión.

## 4.1. Ciclo de vida del vehículo (CVV)

La primera fase a analizar es el ciclo de vida del vehículo en el cual se van a considerar todas las etapas del CVV desde la extracción de materias primas hasta la disposición final del vehículo.

### 4.1.1. Revisión bibliográfica

En contraste con los vehículos ligeros, se ha observado una notable escasez de estudios sobre el análisis de CVV específicamente centrados en vehículos pesados. No obstante, se logró analizar el impacto del CVV para cada tecnología propuesta. La **Tabla 4** recoge los artículos utilizados para este análisis, excluyendo aquellos que no proporcionaban suficiente información para convertir sus datos a la unidad funcional g CO<sub>2</sub> eq/tkm

**Tabla 4.** Recopilación de los artículos empleados para realizar la comparativa del impacto del ciclo de vida de las tecnologías de propulsión consideradas. Fuente: Elaboración propia

Estudio / Artículo	Referencia	Ámbito geográfico
Environmental Life Cycle Assessment of Biogas as a Fuel for Transport Compared with Alternative Fuels	Lyng & Brekke, 2019	Europa
Comparative Life Cycle Assessment of Propulsion Systems for Heavy-Duty Transport Applications	Simons & Azimov, 2021	Reino Unido



Comparative Life Cycle Assessment of Battery and Fuel Cell Electric Cars, Trucks and Buses	Syré et al., 2024	Alemania y China
Hydrogen from wood gasification with CCS-a techno-environmental analysis of production and use as transport fuel	Antonini et al., 2021	Europa
Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fueled vehicles through LCA – Final report	EC, 2020	Europa
A comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of European heavy-duty vehicles and fuels	O’Connell et al., 2023	Europa
Life cycle sustainability assessment of autonomous heavy-duty trucks	Sen et al., 2020	EE.UU
Eco-efficiency of the differential ratio change in a heavy-duty vehicle and implications for the automotive industry	Ferreira et al., 2020	Brasil
Complete LCA of battery electric and conventional fuel vehicles for freight trips	Middela et al., 2022	India
Environmental performance of four different heavy-duty propulsion technologies using Life Cycle Assessment	Rial & Pérez, 2021	Europa
Life-cycle CO <sub>2</sub> mitigation of China’s class-8 heavy-duty trucks requires hybrid strategies	Wang et al., 2022	China
Technical, economic, and environmental feasibility of alternative fuel heavy-duty vehicles in Iceland	Alonso-Villar et al., 2022	Islandia
Life cycle greenhouse gas emissions of alternative fuels and powertrains for medium-duty trucks: A Singapore case study	Yeow et al., 2022	Singapur
Prospective life cycle assessment of alternatively fueled heavy-duty trucks	Van den Oever et al., 2023	Europa

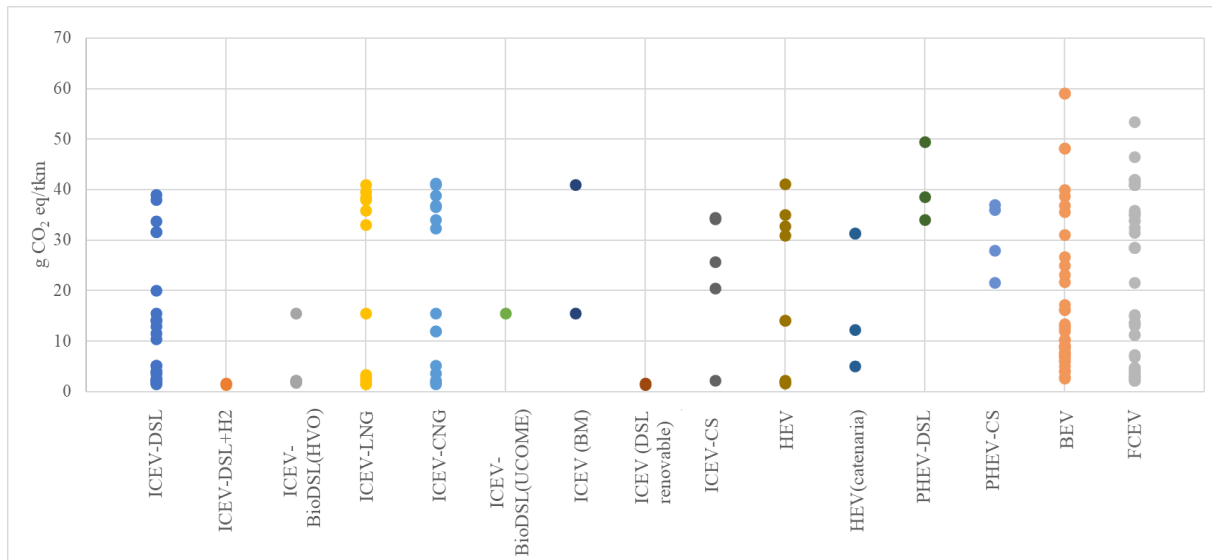
Life Cycle Assessment of an emerging overhead line hybrid truck in short-haul pilot operation	Hanesch et al., 2022	Alemania
Life cycle assessment of hydrogen and diesel dual-fuel class 8 heavy duty trucks	El Hannach et al., 2019	Canadá
The Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Technologies Model (GREET)	ANL, 2020	EE.UU
Vehicle-cycle and life-cycle analysis of medium-duty and heavy-duty trucks in the United States	Iyer et al., 2023	EE.UU
Life cycle assessment of electrification of heavy-duty vehicle	Syed et al., 2019	EU
Life cycle assessment of city buses powered by electricity, hydrogenated vegetable oil or diesel	Nordelöf et al., 2019	Suecia
Life cycle assessment of alternative energy types e including hydrogen e for public city buses in Taiwan	Chang et al., 2019	Taiwán
Carbon footprint of different fuels used in public transportation in Taiwan: a life cycle assessment	Chang & Huang, 2022	Taiwán

La **Figura 11** muestra los resultados obtenidos en términos absolutos a partir de las referencias bibliográficas recogidas en la **Tabla 4**. Como se puede observar, los resultados varían significativamente. Es crucial tener en cuenta que estos datos provienen de estudios realizados en diversos ámbitos geográficos y temporales, lo que implica una amplia gama de condiciones y contextos en los que se han evaluado los vehículos pesados. Además, es importante reconocer que cada investigación aborda vehículos con características y dimensiones específicas, lo que contribuye aún más a la variabilidad de los resultados observados. Esta diversidad de enfoques y condiciones presenta un desafío significativo en el análisis, ya que incluso al comparar los datos en una unidad funcional común, como la masa de CO<sub>2</sub> eq/tkm, el impacto ambiental puede fluctuar considerablemente según el tamaño del vehículo y la cantidad de materia prima

necesaria para su producción. Adicionalmente, se observa una disparidad en la disponibilidad de datos según la tecnología de propulsión estudiada, siendo menor la cantidad de estudios disponibles para tecnologías más innovadoras. En la **Tabla 5** se puede observar el número de artículos revisados para cada tecnología.

**Tabla 5.** Número de artículos revisados y empleados para el cálculo del impacto del CVV según la tecnología de propulsión. Fuente: Elaboración propia

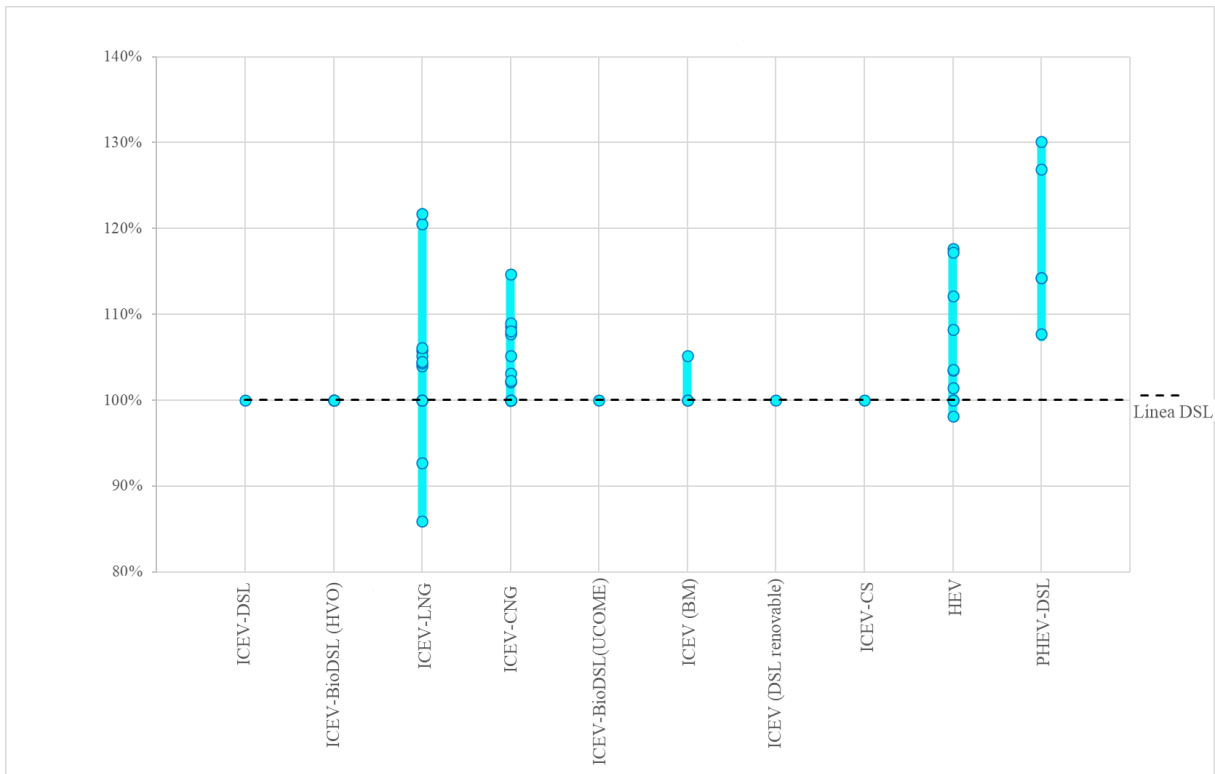
TECNOLOGÍA	ARTÍCULOS REVISADOS
ICEV-DSL	17
ICEV-DSL+H <sub>2</sub>	1
ICEV-BioDSL(HVO)	4
ICEV-LNG	7
ICEV-CNG	6
ICEV-BioDSL(UCOME)	1
ICEV-Biometano	2
ICEV-DSL renovable	1
ICEV-Combustible sintéticos	1
HEV	5
HEV-Catenaria	1
PHEV-DSL	1
PHEV-CS	1
BEV	14
FCEV	11



**Figura 11.** Impacto del ciclo de vida del vehículo para cada tecnología de propulsión considerada según la fuente energética empleada. Fuente: Elaboración propia a partir de las referencias de la **Tabla 4**

Dado lo expuesto anteriormente, comparar las tecnologías en términos absolutos no permite extraer conclusiones claras sobre cuál tiene un mayor impacto. Por esta razón, se ha llevado a cabo una comparación relativa, donde el impacto del diésel representa el 100%. En este sentido, para cada artículo, se dividió el impacto de cada una de las diversas tecnologías entre el valor del impacto del diésel y se multiplicó por 100, con el fin de observar el porcentaje de aumento o disminución del impacto frente al diésel. De esta manera, ya no se están comparando valores de diferentes artículos, lo cual podría conducir a conclusiones erróneas, sino que se están comparando los valores de un mismo artículo.

Debido a que tanto las tecnología BEV, como la FCEV, presentan una gran variabilidad en el impacto de ciclo de vida del vehículo, se han realizado dos gráficos para representar las comparaciones relativas. En la **Figura 12** se ha representado el impacto de las tecnologías ICEV, HEV y PHEV. Por otro lado, en la **Figura 13** se puede observar los resultados obtenidos únicamente para las tecnologías BEV y FCEV.



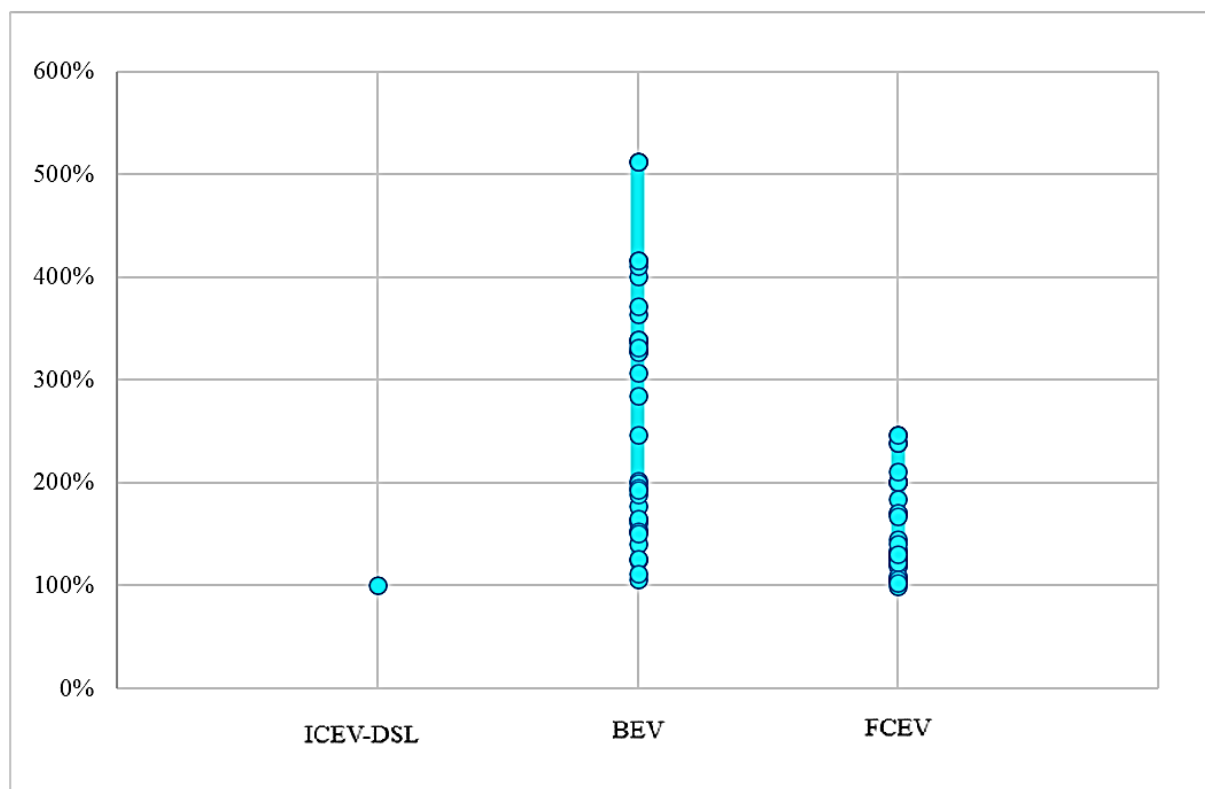
**Figura 12.** Comparación relativa de las emisiones de GEI durante la fase de ciclo de vida del vehículo de las tecnologías de propulsión ICEV, HEV y PHEV frente al diésel. Fuente: Elaboración propia a partir de las referencias de la **Tabla 4**

Primero, se realiza un análisis de la tecnología ICEV. En la mayoría de los artículos revisados, el vehículo pesado es el mismo, independientemente de la fuente energética, por lo que se espera obtener el mismo impacto de CVV. Esto es válido para el biodiésel, el UCOME, el diésel renovable y los combustibles sintéticos. En el caso del ICEV-LNG, hay una pequeña variabilidad, con un impacto de CVV que oscila entre el 86 y el 121% respecto al diésel. El aumento en el rango superior se debe principalmente a la gestión del vehículo al final de su vida útil. Según Rial & Pérez (2021), el impacto en la fase de reciclaje es significativamente mayor para el vehículo LNG en comparación con el diésel, con valores de 76,1 y 36,2 g CO<sub>2</sub> eq/km, respectivamente.

En ICEV-CNG, la variabilidad del impacto (100-115%) se atribuye a la inclusión de un tanque especial. Según O'Connell et al. (2023), los vehículos de gas natural presentan un impacto adicional debido al tanque de gas natural, lo que contribuye a que el impacto del CVV sea mayor en comparación con el diésel tanto para los vehículos LNG como CNG. Para el ICEV-LNG, algunos valores son inferiores al 100%, lo que se debe a que la fase de mantenimiento tiene un impacto superior en el vehículo diésel en comparación con el LNG (O'connell et al., 2023).

En cuanto a las tecnologías ICEV y HEV, el impacto del ciclo de vida es similar, aunque el HEV tiene un impacto un poco mayor porque necesita elementos adicionales como un motor eléctrico y una batería. Según Rupp et al. (2018), en la fase del CVV el HEV emite 0,07 g CO<sub>2</sub> eq/tkm más respecto al ICEV. En la **Figura 12** se muestra que el impacto del CVV para la tecnología HEV varía entre el 98 y el 118% respecto al diésel. El análisis de Rial & Pérez (2021) explica que el ligero descenso del 2% en el impacto respecto al diésel se debe a la fase de producción, que equivale a 170,3 g CO<sub>2</sub> eq/km. Este análisis también incluye las etapas de mantenimiento, reparación y reciclaje. Para la tecnología HEV, estas etapas tienen un impacto de 14,9 y 34,6 g CO<sub>2</sub> eq/km, respectivamente, mientras que para el diésel son de 15,7 y 36,2 g CO<sub>2</sub> eq/km. Por lo tanto, los valores del impacto del CVV son ligeramente menores para la tecnología HEV en comparación con la ICEV.

Para el PHEV, la **Figura 12** muestra un mayor impacto del ciclo de vida del vehículo respecto al ICEV. El rango de valores del impacto está entre el 108 y el 130% respecto al ICEV. Los PHEV comparten similitudes con los HEV, pero incluyen una batería de mayor capacidad que puede ser recargada mediante una fuente de energía externa, según Noroozi et al. (2023).



**Figura 13.** Comparación relativa de las emisiones de GEI durante la fase de ciclo de vida del vehículo de las tecnologías de propulsión BEV y FCEV frente al diésel. Fuente: Elaboración propia a partir de las referencias de la **Tabla 4**

Los BEV y los FCEV presentan un mayor impacto ambiental en la fase del ciclo del CVV. Esto se debe a que requieren sistemas de almacenamiento de energía específicos: baterías de iones de litio para los BEV y celdas de combustible junto con tanques de almacenamiento de hidrógeno para los FCEV. La fabricación de estas tecnologías consume recursos naturales significativos, energía y genera emisiones de GEI, contribuyendo considerablemente al impacto ambiental.

La producción de baterías y celdas de combustible implica la extracción y procesamiento de materiales como litio, cobalto, níquel y platino. Este proceso puede tener impactos ambientales graves, incluyendo la degradación del suelo, la contaminación del agua y la generación de residuos. Al final de su vida útil, tanto las baterías de los BEV como las celdas de combustible de los FCEV deben ser gestionadas adecuadamente para minimizar su impacto ambiental, ya que su disposición inadecuada puede liberar sustancias tóxicas y generar residuos que requieren una gestión especializada (Koroma et al., 2022; Syré et al., 2024).

En la **Figura 13**, se observa que el impacto del ciclo de vida del vehículo para los BEV varía ampliamente, de un 105 a un 513% en comparación con los ICEV. Esta variabilidad se debe principalmente al tamaño de la batería. Los estudios que involucran vehículos pesados BEV con baterías más grandes muestran emisiones significativamente mayores durante el ciclo de vida del vehículo. Según Simons & Azimov (2021), las emisiones del CVV de los BEV pueden ser 7,8 veces mayores que las del ICEV y 3,7 veces mayores que las de los FCEV, debido a la producción de las baterías. El  $\text{LiMnO}_2$ , un componente esencial en las baterías es un principal contribuyente a las emisiones, y su mayor masa en las baterías de BEV provoca un impacto ambiental significativo (Simons & Azimov, 2021).

Algunas investigaciones proyectan escenarios futuros con materiales más ligeros y el uso de energía renovable en la fabricación de baterías, lo que reduciría significativamente las emisiones. Por ejemplo, según EC (2020) en el escenario TECH 1.5, en línea con la contribución de la Unión Europea para cumplir con el objetivo del Acuerdo de París de limitar el aumento de la temperatura global a un máximo de 1,5 °C. En este escenario se considera el uso de energía completamente renovable para la manufactura de vehículos y baterías, predice un impacto del CVV del BEV del 105% respecto al diésel, gracias a las mejoras en la eficiencia y la reducción del tamaño de las baterías.

El impacto del CVV de los FCEV también muestra considerable variabilidad, con impactos que van desde el 99 hasta el 246% en comparación con el diésel. Los FCEV requieren un módulo

de celdas de combustible para suministrar electricidad al vehículo y una batería auxiliar para el almacenamiento energético proveniente del freno regenerativo (Repsol, 2024). Aunque los FCEV tienen un impacto menor comparado con los BEV debido a sus baterías más ligeras, el tanque de hidrógeno comprimido de alta presión, compuesto de plástico reforzado con fibra de carbono, tiene un elevado impacto de producción. Este material no se descarboniza al mismo ritmo que otros, lo que contribuye al impacto ambiental del FCEV.

Comparados con los BEV, los FCEV y los HEV presentan un menor impacto en el CVV debido al uso de baterías de menor tamaño. Los HEV, por ejemplo, dimensionan sus baterías según la capacidad de potencia en lugar de la energía, como ocurre con los BEV (Iyer et al., 2023).

El impacto del CVV de los FCEV se estima en un 99% respecto a la tecnología de ICEV, basado en el análisis del escenario TECH 1.5 de EC (2020). En este escenario, se asume que todo el proceso de manufacturación se llevará a cabo utilizando energías renovables y que las baterías tendrán capacidades menores debido a la mejora en la eficiencia de los vehículos.

Para los FCEV, la principal fuente de impacto ambiental relacionada con el almacenamiento de energía es el tanque de hidrógeno comprimido a alta presión (700 bares), fabricado principalmente con plástico reforzado con fibra de carbono. Este material tiene un impacto de producción muy elevado y no se descarboniza al mismo ritmo que otros materiales debido a que solo una parte de su fabricación depende del consumo de electricidad.

La introducción futura de tecnologías mejoradas de almacenamiento de hidrógeno, con un menor impacto ambiental, podría reducir significativamente los efectos de fabricación de los trenes motrices de los FCEV.

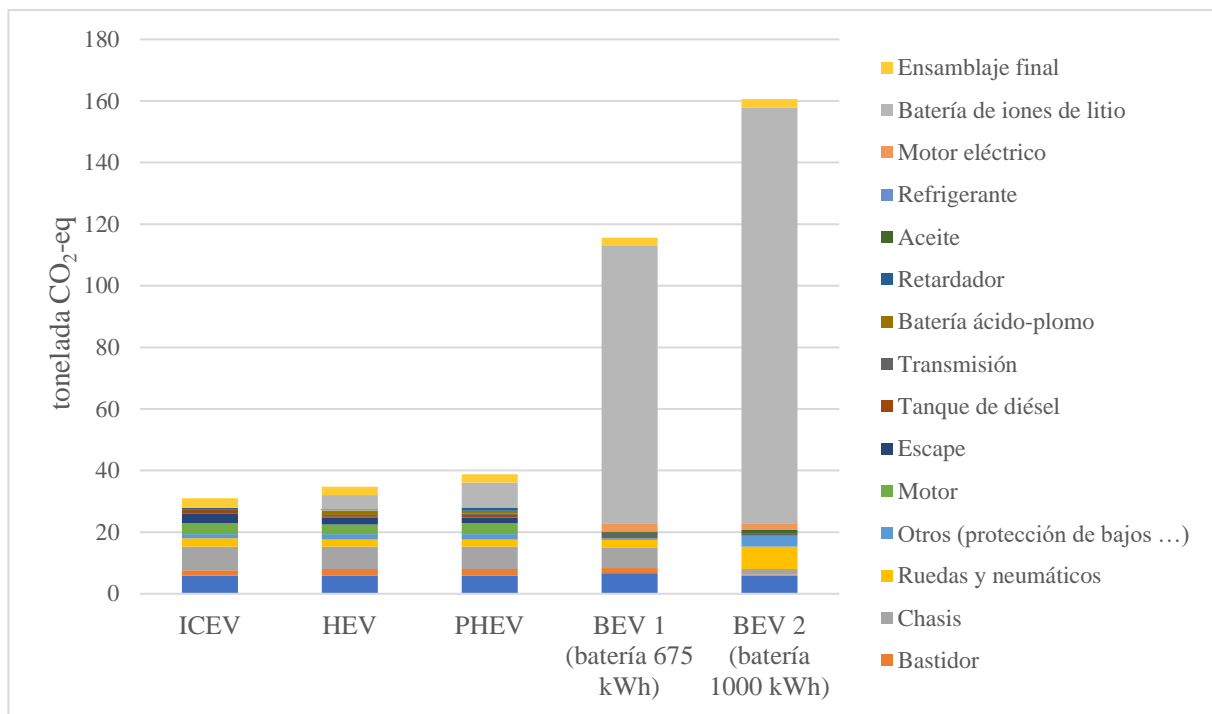
### **4.1.2. Impacto de cada uno de los elementos en la producción de un vehículo pesado**

A continuación, para profundizar más sobre el impacto durante el proceso de producción de los vehículos pesados se va a realizar el análisis de la fase "Cradle-to-gate" (CtG). Esta fase hace referencia a un enfoque en el ACV que se centra en las etapas desde la extracción de materias primas (la "cuna") hasta la producción en la fábrica (la "puerta"), excluyendo la fase de uso del producto y su fin de vida. Este enfoque se utiliza para evaluar el impacto ambiental y los costes asociados con la fabricación de un producto específico, en este caso un vehículo pesado



permitiendo identificar áreas clave de mejora en la cadena de suministro y la producción (Wolff et al., 2020).

A partir de Wolff et al. (2020) se ha realizado la **Figura 14** la cual muestra el impacto en toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente de cada uno de los elementos necesarios para la fabricación de un vehículo pesado en el ámbito europeo para diferentes tecnologías de impulsión.



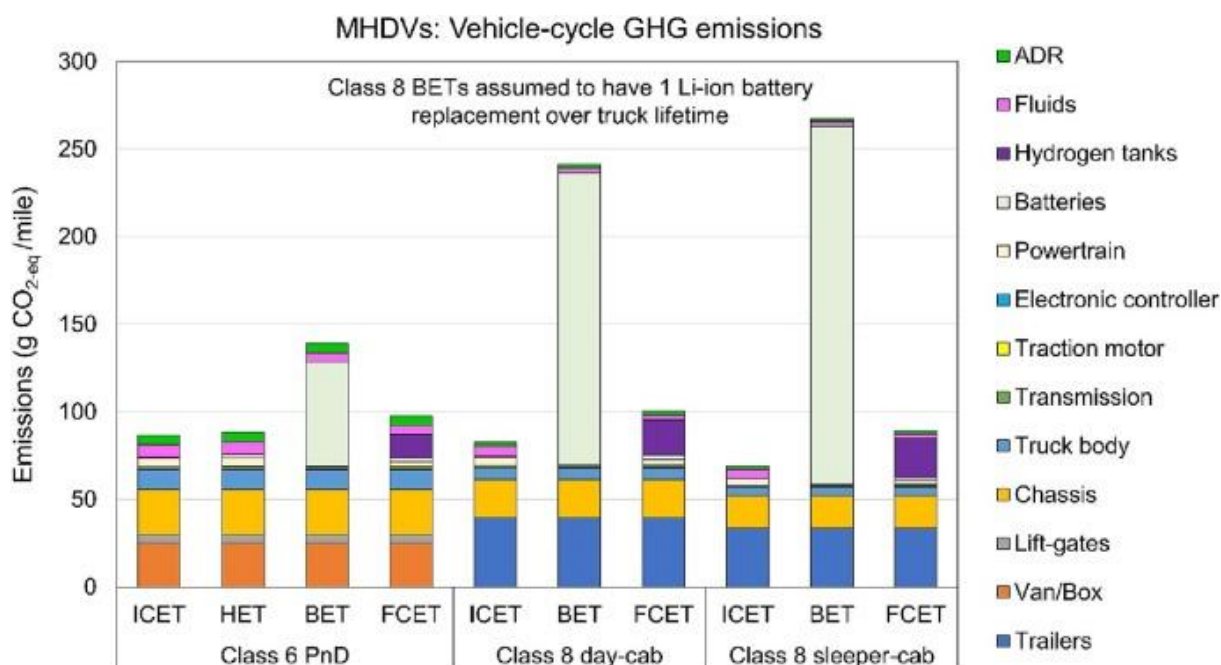
**Figura 14.** Impacto en toneladas de CO<sub>2</sub> eq de cada uno de los elementos necesarios para la producción de un tractor pesado en ámbito europeo. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Wolff et al. (2020)

La **Figura 14**, muestra que, en los ICEV, HEV y PHEV, componentes como el motor, la cabina y el chasis tienen un impacto significativo en el ciclo de vida. En los HEV y PHEV, además, se debe considerar el impacto del motor eléctrico y la batería de iones de litio. La batería de iones de litio tiene un impacto considerablemente mayor en estos vehículos en comparación con el motor eléctrico. Aunque tanto HEV como PHEV utilizan baterías de iones de litio, su impacto ambiental es menor en comparación con los vehículos totalmente eléctricos, ya que sus baterías son de menor capacidad y potencia.

Los resultados subrayan la importancia crítica de la batería de iones de litio en la huella de carbono total de los BEV. La fabricación y el uso de estas baterías contribuyen significativamente a las emisiones de GEI. La **Figura 14** ilustra que para vehículos pesados eléctricos que recorren largas distancias, el impacto de las baterías aumenta notablemente con

su capacidad. Por ejemplo, pasar de una batería de 675 kW a una de 1000 kW incrementa el impacto de 90 a 134,98 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente, un aumento del 38%.

La **Figura 15**, extraída de Iyer et al. (2023), compara el impacto de los elementos necesarios para fabricar un FCEV con otros tipos de vehículos. Se confirma que los HEV tienen un mayor impacto que los ICEV, y los BEV tienen el mayor impacto. A medida que aumenta el tamaño del camión (desde la clase 6 "Class 6 PnD" hasta la clase 8 "sleeper-cab"), el impacto de la batería también aumenta debido a la necesidad de mayor potencia. Los FCEV presentan un impacto mayor que los ICEV y los HEV, pero menor que los BEV, debido principalmente al tanque de hidrógeno y al sistema de celda de combustible.



**Figura 15.** Impacto en g CO<sub>2</sub> eq/milla de cada uno de los componentes necesarios para la fabricación de tres tipologías de vehículos pesados empleando diferentes tecnologías entre las que se encuentran los ICEV, HEV, BEV, PHEV. Fuente: Iyer et al. (2023)

## 4.2. Fase del pozo al tanque (WTT)

A continuación, se presenta un análisis detallado del CVFE, el cual se puede dividir en dos etapas: WTT y TTW. Primero se analiza la fase WTT en la cual se examinan las emisiones de GEI generadas durante el proceso de obtención, transformación y distribución de cada fuente energética.

### 4.2.1. Revisión bibliográfica

A diferencia de la revisión bibliográfica realizada para el ciclo CVV, la disponibilidad de artículos es considerablemente mayor en el caso del CVFE. Al igual que en el apartado 4.1.1, la unidad funcional empleada para estudiar la variabilidad de las emisiones es el g CO<sub>2</sub> eq/tkm. Los artículos que usan una unidad funcional diferente y no proporcionan suficiente información para convertirla a la unidad de interés no se incluyeron en el análisis de emisiones de la fase WTT en valores absolutos, pero sí en el análisis relativo. En la **Tabla 6** se recopilan todos los estudios revisados y utilizados en este análisis.

**Tabla 6.** Recopilación de los artículos empleados para realizar la comparativa del impacto de la fase WTT de las tecnologías de propulsión consideradas. Fuente: elaboración propia

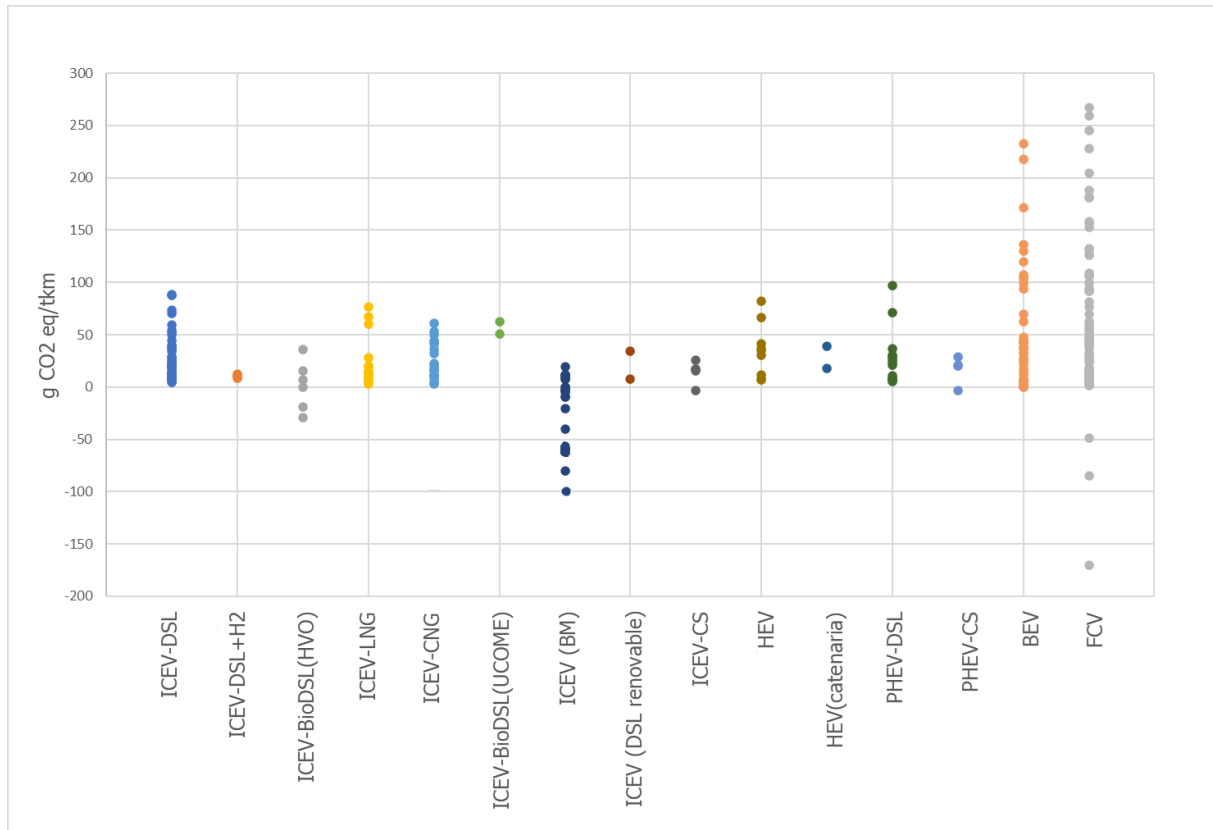
Estudio / Artículo	Referencia	Ámbito geográfico
Well-to-Wheels Analysis of Zero-Emission Plug-In Battery Electric Vehicle Technology for Medium- And Heavy-Duty Trucks	Liu et al., 2021	EE.UU
Liquefied biomethane for heavy-duty transport in Italy: A well-to-wheels approach	Tratzi et al., 2022	Italia
Can natural gas reduce emissions from transport?	Speirs et al., 2019	Reino Unido
Life-cycle implications of hydrogen fuel cell electric vehicle technology for medium- and heavy-duty trucks	D. Y. Lee et al., 2018	EE.UU
Comparing alternative heavy-duty drivetrains based on GHG emissions, ownership and abatement costs: Simulations of freight routes in British Columbia	Mojtaba Lajevardi et al., 2019	Canadá
An environmental and economic assessment for biomethane injection and natural gas heavy goods vehicles	Keogh et al., 2024	Irlanda

Review of Well-to-Wheel lifecycle emissions of liquefied natural gas heavy goods vehicles	Stettler et al., 2023	Europa EE.UU China
Cleaner heavy transports – Environmental and economic analysis of liquefied natural gas and biomethane	Gustafsson & Svensson, 2021	Alemania
Life cycle assessment and risk assessment of liquefied natural gas vehicles promotion	Sun & Ertz, 2022	Canadá
Comparative life cycle assessment of heavy-duty drivetrains: A Norwegian study case	Booto et al., 2021	Noruega
Techno-econo-environmental comparisons of zero- and low-emission heavy-duty trucks	Gunawan & Monaghan, 2022	Irlanda
Projecting adoption of truck powertrain technologies and CO <sub>2</sub> emissions in line-haul networks	Guerrero de la Peña et al., 2020	EE.UU
Carbon footprint of different fuels used in public transportation in Taiwan: a life cycle assessment	Chang & Huang, 2022	Taiwán
Life cycle assessment of electrification of heavy-duty vehicle	Syed et al., 2019	Europa
Life cycle assessment of alternative energy types – including hydrogen – for public city buses in Taiwan	Chang et al., 2019	Taiwán
Life cycle assessment of city buses powered by electricity, hydrogenated vegetable oil or diesel	Nordelöf et al., 2019	Suecia

Environmental Life Cycle Assessment of Biogas as a Fuel for Transport Compared with Alternative Fuels	Lyng & Brekke, 2019	Europa
Comparative Life Cycle Assessment of Propulsion Systems for Heavy-Duty Transport Applications	Simons & Azimov, 2021	Reino Unido
Hydrogen from wood gasification with CCS-a techno-environmental analysis of production and use as transport fuel	Antonini et al., 2021	Europa
Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through LCA – Final report	EC, 2020	Europa
A comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of European heavy-duty vehicles and fuels	O'connell et al., 2023	Europa
Life cycle sustainability assessment of autonomous heavy-duty trucks	Sen et al., 2020	EE.UU
Eco-efficiency of the differential ratio change in a heavy-duty vehicle and implications for the automotive industry	Ferreira et al., 2020	Brasil
Complete LCA of battery electric and conventional fuel vehicles for freight trips	Middela et al., 2022	India
Environmental performance of four different heavy-duty propulsion technologies using Life Cycle Assessment	Rial & Pérez, 2021	Europa
Life-cycle CO <sub>2</sub> mitigation of China's class-8 heavy-duty trucks requires hybrid strategies	Wang et al., 2022	China

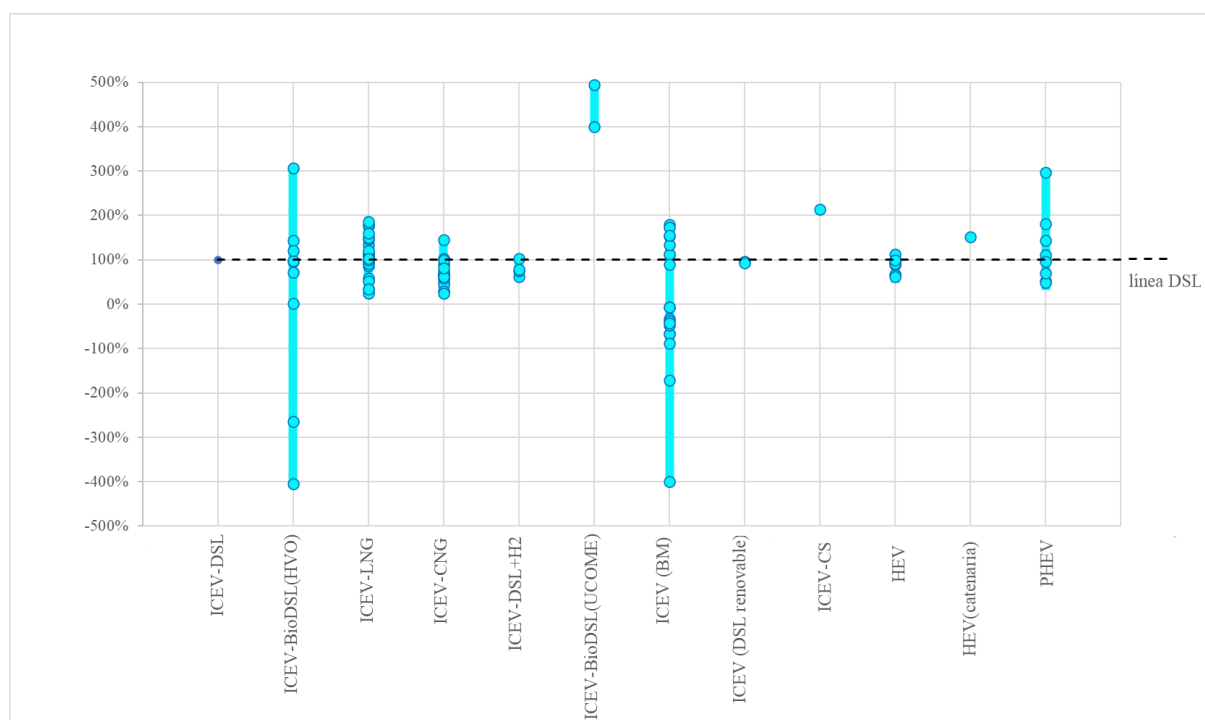
Technical, economic, and environmental feasibility of alternative fuel heavy-duty vehicles in Iceland	Alonso-Villar et al., 2022	Islandia
Life cycle greenhouse gas emissions of alternative fuels and powertrains for medium-duty trucks: A Singapore case study	Yeow et al., 2022	Singapur
Prospective life cycle assessment of alternatively fueled heavy-duty trucks	van den Oever et al., 2023	Europa
Life Cycle Assessment of an emerging overhead line hybrid truck in short-haul pilot operation	Hanesch et al., 2022	Alemania
Life cycle assessment of hydrogen and diesel dual-fuel class 8 heavy duty trucks	El Hannach et al., 2019	Canadá
Vehicle-cycle and life-cycle analysis of medium-duty and heavy-duty trucks in the United States	Iyer et al., 2023	EE.UU

En la **Figura 16** se presentan los resultados obtenidos a partir de las referencias de la **Tabla 6**, expresados en unidades absolutas (g CO<sub>2</sub> eq/tkm). Se observa una amplia variabilidad en los resultados, especialmente en las tecnologías BEV y FCEV, debido a que los procesos de obtención para sus respectivas fuentes energéticas son muy diversos. Esta variabilidad se debe a que los estudios recopilados se han realizado en diversos contextos geográficos y para distintos tipos de vehículos pesados. Extraer conclusiones claras a partir de la **Figura 16** resulta difícil debido a esta diversidad. Por lo tanto, para realizar un análisis más coherente, se procede a expresar los resultados en términos relativos respecto al diésel de cada artículo.



**Figura 16.** Impacto de la fase WTT para cada tecnología de propulsión considerada según la fuente energética empleada en las unidades g CO<sub>2</sub> eq/tkm. Fuente: Elaboración propia a partir de las referencias de la **Tabla 6**

Al igual que en el impacto del CVV, tanto las tecnología BEV, como la FCEV, presentan una gran variabilidad en la fase WTT. Por ello, se han realizado dos gráficos para representar las comparaciones relativas. En la **Figura 17** se ha representado el impacto de las tecnologías ICEV, HEV y PHEV. Por otro lado, en la **Figura 18** se puede observar los resultados obtenidos únicamente para las tecnologías BEV y FCEV.



**Figura 17.** Comparación relativa de las emisiones de GEI durante la fase WTT de las tecnologías de propulsión ICEV, HEV y PHEV frente al diésel. Fuente: Elaboración propia a partir de las referencias de la **Tabla 6**

Al observar la **Figura 17**, se destacan los valores de impacto de los ICEV que utilizan biocombustibles (HVO, UCOME, biometano) y combustibles sintéticos. En todos los casos hay valores que superan la línea de referencia del diésel.

Para el biodiésel, el impacto en la fase WTT varía ampliamente, desde un -404 hasta 307%. Se esperaría que el biodiésel tuviera un impacto menor o incluso negativo porque el CO<sub>2</sub> liberado durante su combustión es neutral, ya que fue previamente absorbido por las plantas durante su crecimiento.

En los estudios de Nordelöf et al. (2019); Gustafsson et al. (2021) y Lyng & Brekke (2019), el biodiésel presenta emisiones de la fase WTT por encima del diésel en un 144, 307 y 120%, respectivamente. Esto se debe a que consideran las emisiones neutras en la fase TTW. Para el biodiésel UCOME, las emisiones varían entre 400 y 495%, por la misma razón.

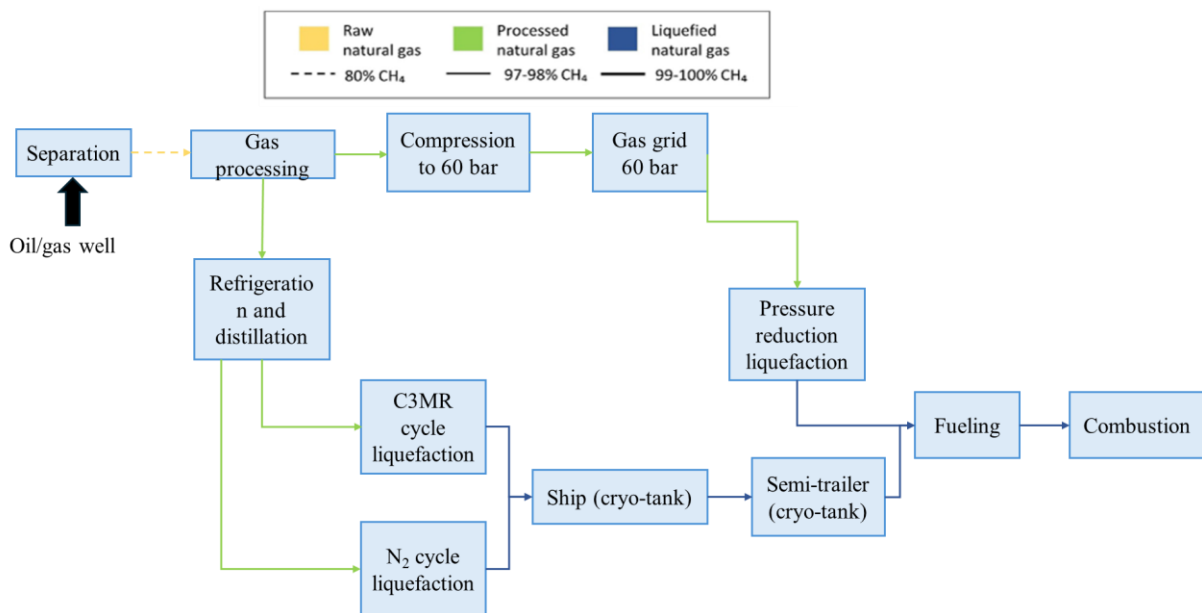
El biometano muestra una gran variabilidad en su impacto en la fase WTT, con valores entre un 400 y 180%. Los valores más altos también provienen de Lyng & Brekke (2019), mientras que los más bajos se explican en Mojtaba Lajevardi et al. (2019), que considera el biometano de vertederos como una emisión negativa debido a la prevención de la quema de metano.



El impacto del diésel renovable en la fase WTT es equivalente al del diésel (100%), ya que Alonso-Villar et al. (2022) consideran las emisiones en la fase TTW como neutras. Los combustibles sintéticos, según ANL (2020), presentan un impacto del 214%, aunque en la fase TTW las emisiones de combustión serán menores que las del diésel.

En cuanto a las fuentes de energía LNG y CNG, los impactos varían entre el 25 y el 186% para LNG y entre el 25 y el 145% para CNG, en comparación con el diésel. Esta variabilidad se debe a las diferentes formas de obtención y procedencias del gas utilizado.

Por ejemplo, en la revisión de Gustafsson & Svensson (2021) se analizan tres vías diferentes para la extracción y producción del LNG en la fase WTT, las cuales se presentan en la **Figura 18**.



**Figura 18.** Esquema de las diferentes escenas en la fase WTT para el LNG. Cada una de las tres vías de obtención representa un posible escenario desde la producción hasta la combustión. Fuente: Elaboración propia a partir de Gustafsson & Svensson (2021)

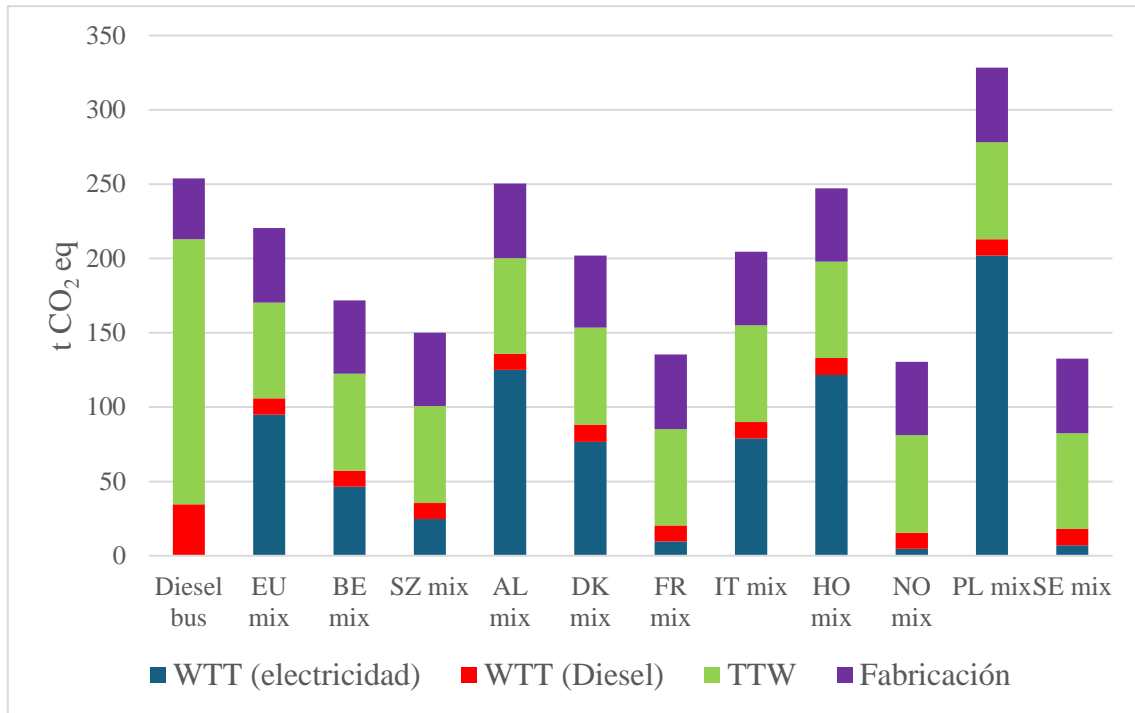
Si se utiliza el método C3MR, el impacto es del 133%; con el ciclo de licuefacción de N<sub>2</sub>, el impacto es del 147%; y con la vía de compresión, el impacto es del 180%. En contraste, Lyng & Brekke (2019) reporta un impacto del gas natural en la fase WTT del 53%, ya que consideran que la materia prima es gas de vertedero. Lo mismo aplica al CNG en este estudio, con un impacto del 43% debido al uso de gas de vertedero, a diferencia de otras investigaciones que utilizan gas natural fósil, lo que incrementa el impacto en esta fase.

Para la tecnología HEV, el impacto varía entre un 63 y un 113%. Esta variabilidad se debe al modo de funcionamiento de los vehículos híbridos, que utilizan tanto un motor de combustión interna como motores eléctricos. Los camiones híbridos emplean el modo eléctrico a bajas velocidades o en situaciones de arranque, principalmente durante el reparto urbano. Por el contrario, cuando se trata de repartos interurbanos, donde se alcanzan mayores velocidades y hay menos paradas, se utiliza principalmente el motor de combustión.

En Iyer et al. (2023), se observa un impacto superior del 63% respecto al diésel cuando el vehículo híbrido opera principalmente en entornos urbanos, resultando en menores emisiones de GEI en la fase WTT. En cambio, Alonso-Villar et al. (2022) reportan un impacto del 113% para un camión que realiza trayectos interurbanos.

Finalmente, los PHEV presentan un rango de impacto en la fase WTT de entre 49 y 296%. Los PHEV combinan un motor de combustión interna y uno eléctrico, cuya batería puede cargarse mediante una fuente de energía externa, frenado regenerativo o el propio motor de combustión interna (Nelsen, 2015). Las emisiones en la fase WTT dependen principalmente del mix energético utilizado para cargar las baterías.

En Syed et al. (2019), se compara el impacto de un autobús PHEV con diferentes mixes energéticos. El valor máximo de impacto (296%) se obtiene con el mix energético europeo del año 2019. La **Figura 19** presenta las variaciones en las emisiones del vehículo PHEV según el mix energético, y la **Tabla 7** muestra la intensidad de carbono en la red eléctrica de cada país europeo analizado para el año 2019.



**Figura 19.** Emisiones de todo el ciclo de vida separadas en las fases WTT (electricidad), WTT(diésel), TTW y fabricación para un bus con tecnologías ICEV y PHEV según el mix energético del país en el año 2019. Fuente: Elaboración propia a partir de Syed et al. (2019)

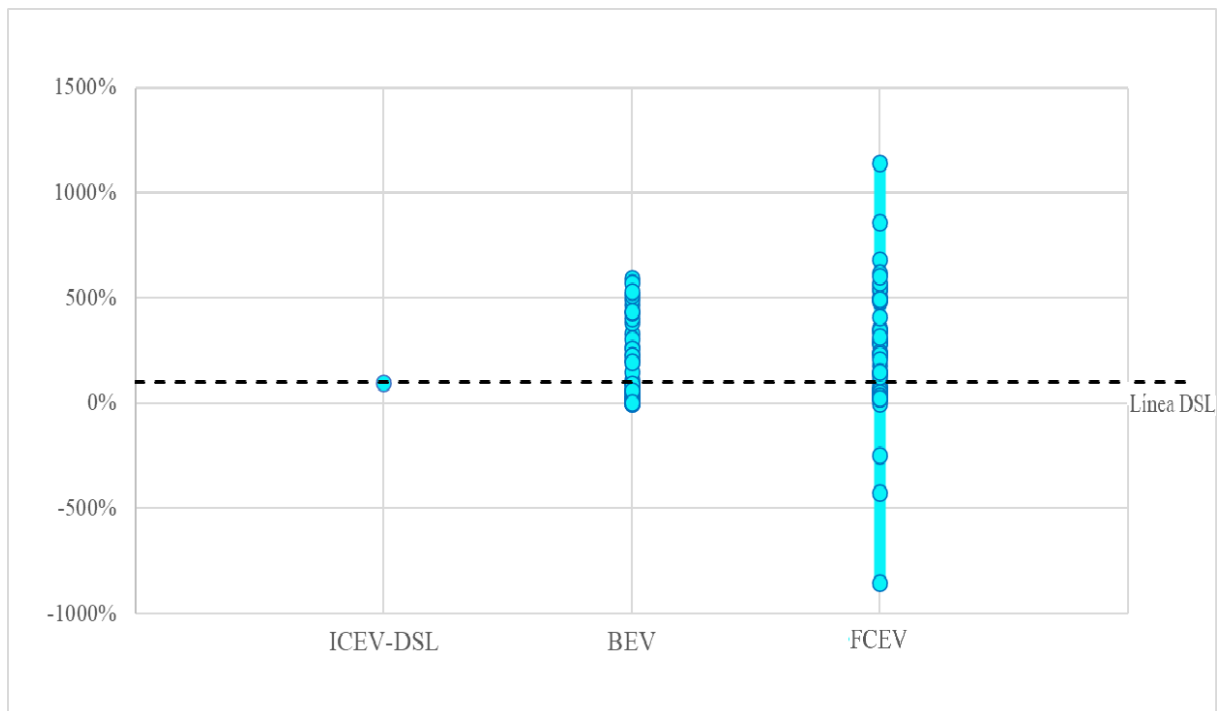
**Tabla 7.** Intensidad en carbono en kg/kWh de la red eléctrica según el país para el año 2019. Fuente: Elaboración propia a partir de Syed et al. (2019)

País	Intensidad en carbono (kg/kWh)
Bélgica(BE)	0,25
Dinamarca(DK)	0,41
Alemania(AL)	0,63
Francia (FR)	0,06
Italia (IT)	0,43
Polonia (PL)	1,08
Holanda(HO)	0,64
Noruega (NO)	0,03
Suecia(SE)	0,05
Suiza(SZ)	0,13
Media EU	0,48

En la **Figura 19** se observa una clara diferencia entre países con baja intensidad de carbono, como Noruega, Suecia y Francia, que dependen principalmente de energía hidroeléctrica y nuclear, y otros como los Países Bajos y Alemania, que tienen una mezcla energética con una intensidad de carbono similar. En los primeros, las emisiones de GEI durante la vida útil de un PHEV son notablemente menores que las de un autobús diésel. En cambio, en los Países Bajos

y Alemania, las emisiones de GEI son casi idénticas a las de un autobús diésel. Por otro lado, en Polonia, donde la dependencia del carbón es alta, el desempeño del PHEV es peor en términos de emisiones de GEI que el del autobús diésel.

La **Figura 20** muestra que tanto los BEV como los FCEV tienen una amplia variabilidad en su impacto durante la fase WTT. Para los BEV, los valores oscilan entre un 0 y un 594%, mientras que para los FCEV, van desde un -850 hasta un 1.140%. Esta variabilidad se debe principalmente a la diversidad de fuentes energéticas utilizadas.

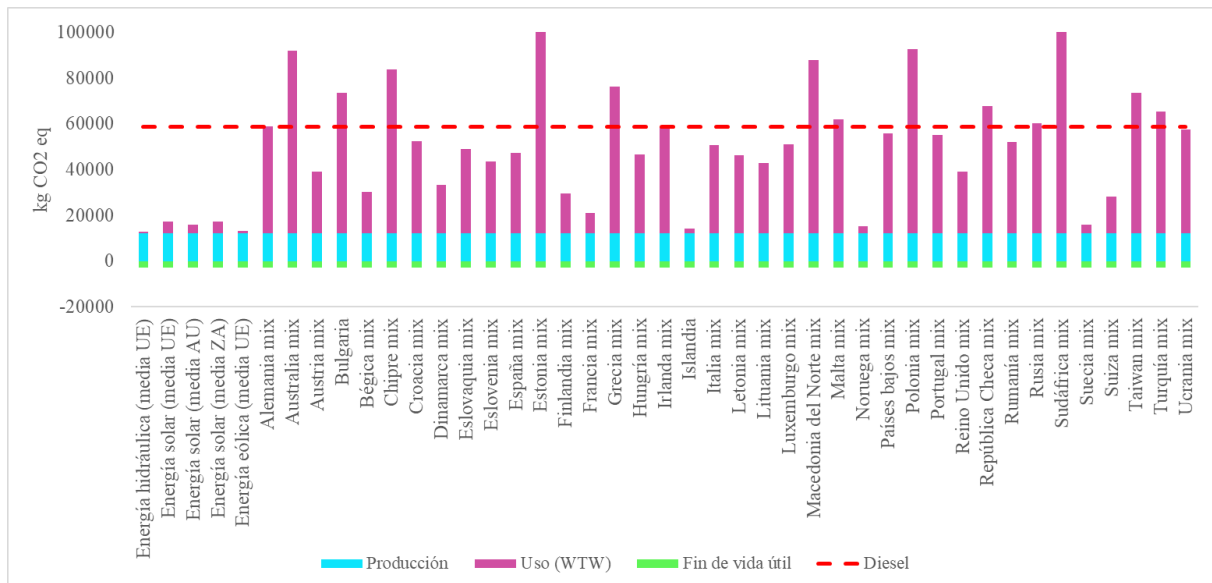


**Figura 20.** Comparación relativa de las emisiones de GEI durante la fase WTT de las tecnologías de propulsión BEV y FCEV frente al diésel. Fuente: Elaboración propia a partir de las referencias de la **Tabla 6**

La variabilidad en el impacto de la fase WTT de los BEV depende en gran medida de la composición del mix energético de la red eléctrica. Por ejemplo, en Iyer et al. (2023), el valor máximo del rango (594%) se obtiene con el mix energético de Estados Unidos en 2021, que incluye un alto porcentaje de carbón y gas natural. Por otro lado, el valor mínimo del rango (0%) se proyecta para 2035, cuando se espera que los BEV se carguen exclusivamente con energía renovable.

Para entender mejor el efecto del mix energético en la fase WTT de un BEV, se ha utilizado una herramienta proporcionada por VOLVO que calcula el impacto ambiental de sus camiones en

función del mix energético de diferentes países. La **Figura 21** muestra los resultados para un camión Volvo FE eléctrico usado para entregas urbanas con un kilometraje anual de 83.000 km.

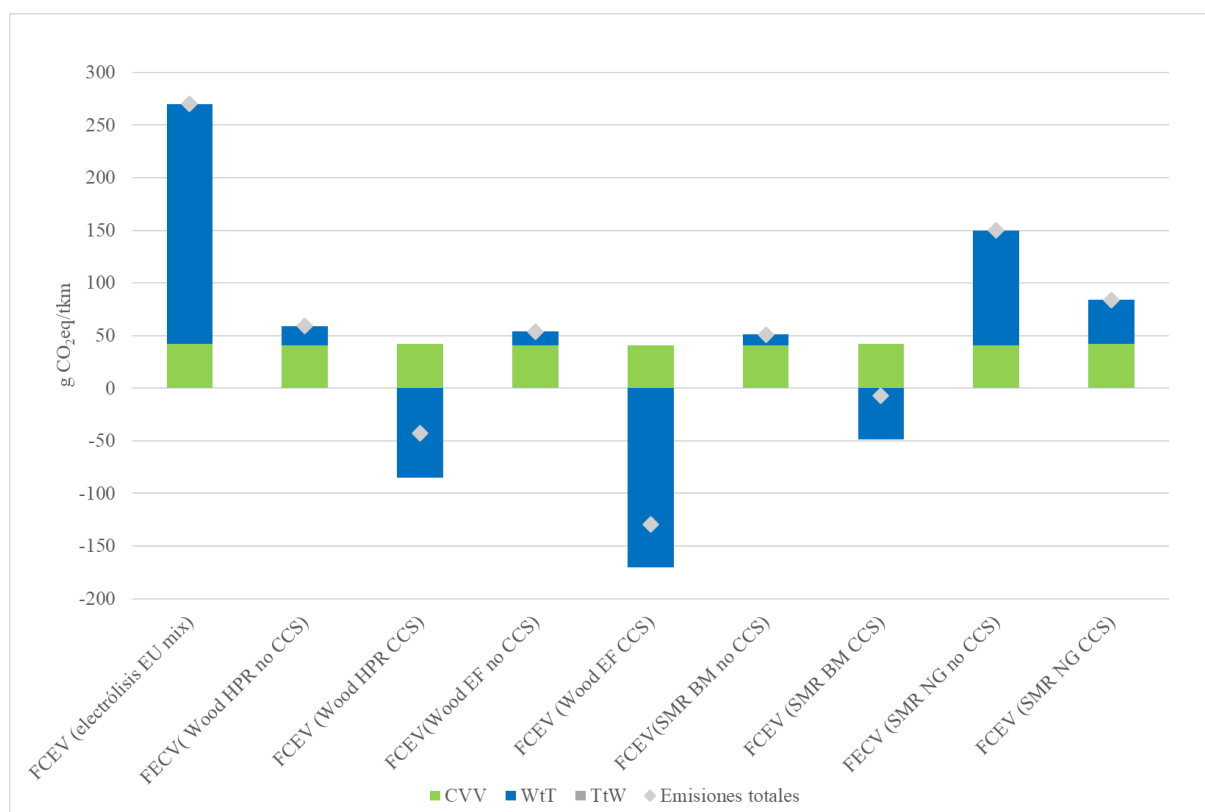


**Figura 21.** Impacto del ciclo de vida de un camión Volvo Fe eléctrico separado en las fases de producción, uso y fin de vida útil según el mix energético empleado. Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la **Figura 21**, Suecia, Noruega e Islandia destacan por tener el menor impacto ambiental asociado al uso de camiones eléctricos debido a sus mixes energéticos basados en fuentes renovables como la energía hidráulica y eólica. En contraste, países como Australia, Estonia, Macedonia del Norte y Polonia tienen un impacto ambiental considerablemente mayor debido a que sus mixes energéticos dependen en gran medida de combustibles fósiles como el carbón y el petróleo, que generan significativas emisiones de GEI durante su extracción, procesamiento y combustión.

La energía hidráulica y eólica son las fuentes renovables más eficientes para reducir las emisiones de GEI en la fase WTT, como lo indica el análisis de la **Figura 21**. En particular, la energía hidráulica presenta un desempeño excepcional en este sentido.

Finalmente, se analiza la tecnología de propulsión FCEV, donde los vehículos utilizan motores eléctricos y obtienen energía de una celda de combustible que emplea hidrógeno. La variabilidad en el impacto de la fase WTT para un FCEV se debe al proceso de obtención del H<sub>2</sub>. Ambos extremos del rango de impacto, tanto 1.140% como el -850%, provienen de Antonini et al. (2021), donde analizan el impacto del ciclo de vida de un vehículo pesado con tecnología FCEV según el método de obtención del H<sub>2</sub>.



**Figura 22.** Emisiones de GEI totales de un camión en g CO<sub>2</sub> eq/tkm con tecnología HEV según el método de obtención del H<sub>2</sub> separado en las fases CVV, WTT y TTW. Fuente: Elaboración propia a partir de Antonini et al. (2021)

La **Figura 22** muestra las emisiones de GEI totales de un camión con tecnología FCEV en g CO<sub>2</sub> eq/tkm, desglosadas en las fases CVV, WTT y TTW, según el método de obtención del H<sub>2</sub>. En Antonini et al. (2021) describen tres tecnologías diferentes para la producción de H<sub>2</sub>: a partir de biomasa y gasificación de leña, reformado de gas natural con vapor (“Steam Methane Reforming”, SMR) y biometano con CCS. Las tecnologías de gasificación de leña incluyen el reformador de tubos de calor (HPR), la gasificación de lecho fluidizado mejorada por sorción (oxySER) y la gasificación de flujo entrante (EF). Estas tecnologías tienen un nivel de madurez tecnológica (TRL) superior a 6 y ofrecen diferentes enfoques para la producción de hidrógeno a partir de biomasa.

La producción de hidrógeno a partir de gas natural y biometano utiliza procesos de reformado con CCS, como el SMR y la reformación autotérmica (ATR). Estos procesos implican la limpieza del gas, eliminación de contaminantes y captura de dióxido de carbono, lo que contribuye a reducir las emisiones de GEI.

Por otro lado, la producción de hidrógeno a partir de biomasa también incluye procesos de limpieza del gas y CCS. Según la **Figura 22**, utilizar biomasa como materia prima ofrece una

significativa reducción de las emisiones de GEI en comparación con los combustibles fósiles. Sin embargo, el peor escenario de emisiones ocurre cuando el hidrógeno se produce mediante electrólisis utilizando el mix energético de la Unión Europea.

Al analizar la **Figura 22**, se observa que las emisiones totales de un camión con tecnología FCEV que usa biomasa como materia prima varían entre -129 y 59 g CO<sub>2</sub> eq/tkm, siendo las emisiones más bajas cuando se emplea la tecnología de gasificación de EF con CCS. En contraste, para un camión FCEV que utiliza gas natural y biometano, las emisiones oscilan entre -7 y 84 g CO<sub>2</sub> eq/tkm, con las menores emisiones registradas usando SMR con CCS.

#### **4.2.2. Análisis del informe JEC**

El consorcio JEC, formado por el Centro Común de Investigación de la Comisión Europea (EC-JRC), EUCAR y Concawe, proporciona evaluaciones actualizadas sobre el uso de energía y emisiones de GEI durante la fase WTW de diversas tecnologías de propulsión y combustibles futuros en Europa.

El informe Well-To-Tank del JEC, parte de una serie de informes relacionados con el ciclo WTW, describe el proceso de producción, transporte, fabricación y distribución de varios combustibles adecuados para sistemas de propulsión de transporte por carretera. La versión 5 del informe JEC WTT evalúa las emisiones incrementales asociadas con la producción de combustibles alternativos en comparación con la producción actual.

El objetivo del consorcio JEC es proporcionar datos precisos que apoyen la formulación de políticas y regulaciones ambientales, ayudando a identificar las tecnologías más sostenibles para reducir el impacto ambiental del transporte pesado en Europa. El análisis incluye tecnologías como ICEV, BEV, FCEV, HEV y PHEV, evaluando sus emisiones a lo largo de todo el CVFE.

El análisis del JEC WTT v5 modela más de 250 trayectorias diferentes, lo que resulta en una enorme variabilidad en términos de energía consumida en la fase WTT y emisiones GEI.





Este análisis detallado demuestra que la elección de la fuente energética y el proceso de producción del hidrógeno y otros combustibles alternativos son cruciales para determinar su impacto ambiental. La identificación y adopción de las tecnologías más sostenibles pueden contribuir significativamente a reducir las emisiones de GEI en el sector del transporte.

### 4.3. Fase del tanque a la rueda (TTW)

A continuación se procede con el análisis de la segunda fase del CVFE: la fase TTW. En esta etapa, se analizan las emisiones de GEI generadas durante el uso del combustible en el vehículo. La fase TTW es fundamental para entender el impacto ambiental relacionado con la combustión y la eficiencia de los distintos tipos de combustibles durante la operación de los vehículos.

#### 4.3.1 Revisión bibliográfica

Como se ha mencionado previamente, la disponibilidad de investigaciones es considerablemente mayor en el caso del CVFE. La unidad funcional empleada para estudiar la variabilidad de las emisiones es el g CO<sub>2</sub> eq/tkm. Además de todos los artículos recopilados en la **Tabla 6**, en la **Tabla 8** se encuentra el artículo adicional que ha sido revisado y empleado para realizar el análisis.

**Tabla 8.** Estudio adicional empleado en el análisis de la fase TTW. Fuente: Elaboración propia

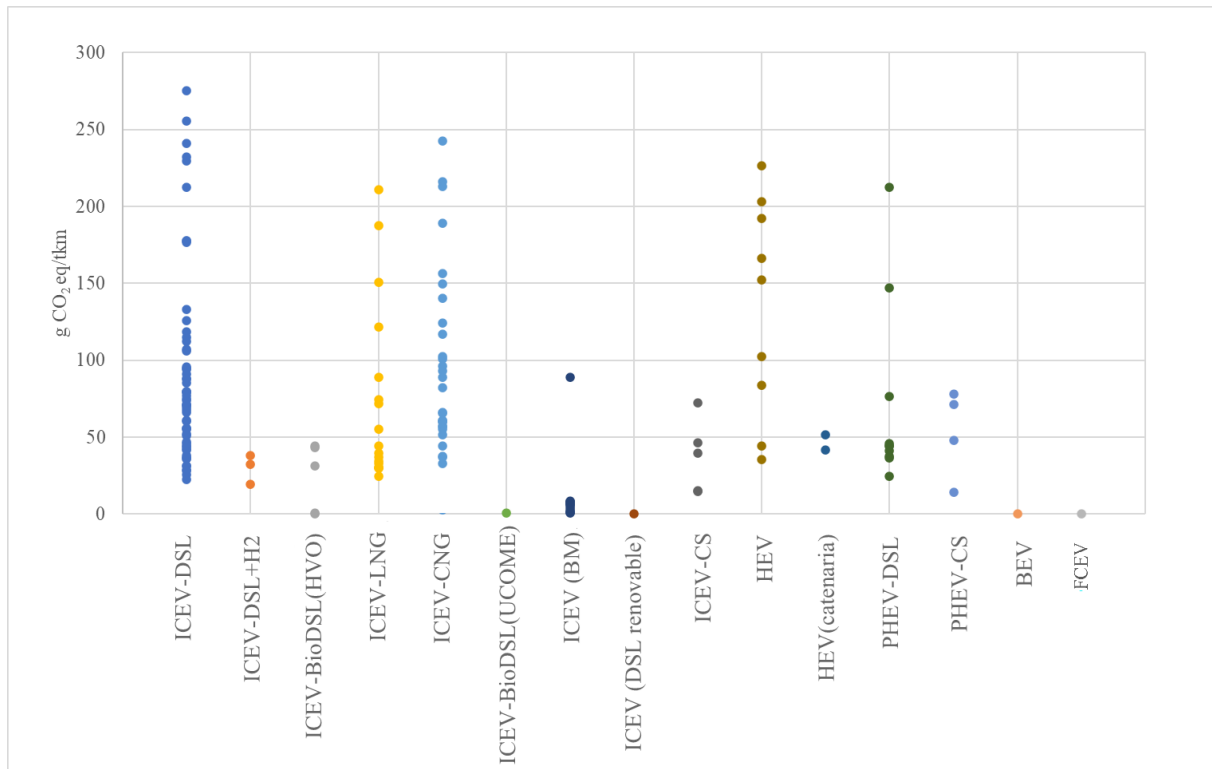
ESTUDIO / ARTÍCULO	REFERENCIA	ÁMBITO GEOGRÁFICO
Examining the role of natural gas and advanced vehicle technologies in mitigating CO <sub>2</sub> emissions of heavy-duty trucks: Modeling prototypical British Columbia routes with road grades	Lajevardi et al., 2018	Canadá

En la **Figura 24** se presentan los resultados obtenidos a partir de las referencias de la **Tabla 6** y la **Tabla 8**, expresados en unidades absolutas (g CO<sub>2</sub> eq/tkm). Se observa una amplia variabilidad en los resultados, especialmente en tecnologías que emplean combustibles fósiles. Esta variabilidad se debe a que los estudios recopilados se han realizado en diversos contextos geográficos y para distintos tipos de vehículos pesados. Por esta razón, al igual que en los

apartados relacionados con el análisis de CVV y la fase WTT, se expresan los resultados en unidades relativas para extraer conclusiones más sensatas. Adicionalmente, la disponibilidad de investigaciones varía según la tecnología de propulsión estudiada, siendo menor para las tecnologías más innovadoras. En la **Tabla 9** se muestra el número de artículos revisados para cada tecnología, coincidiendo con el número de artículos revisados en el análisis de la fase WTT, con la excepción de un artículo adicional de la **Tabla 8** que estudia el CNG como fuente energética.

**Tabla 9.** Número de artículos revisados y empleados para el cálculo del impacto en las fases WTT y TTW según la tecnología de propulsión. Fuente: Elaboración propia

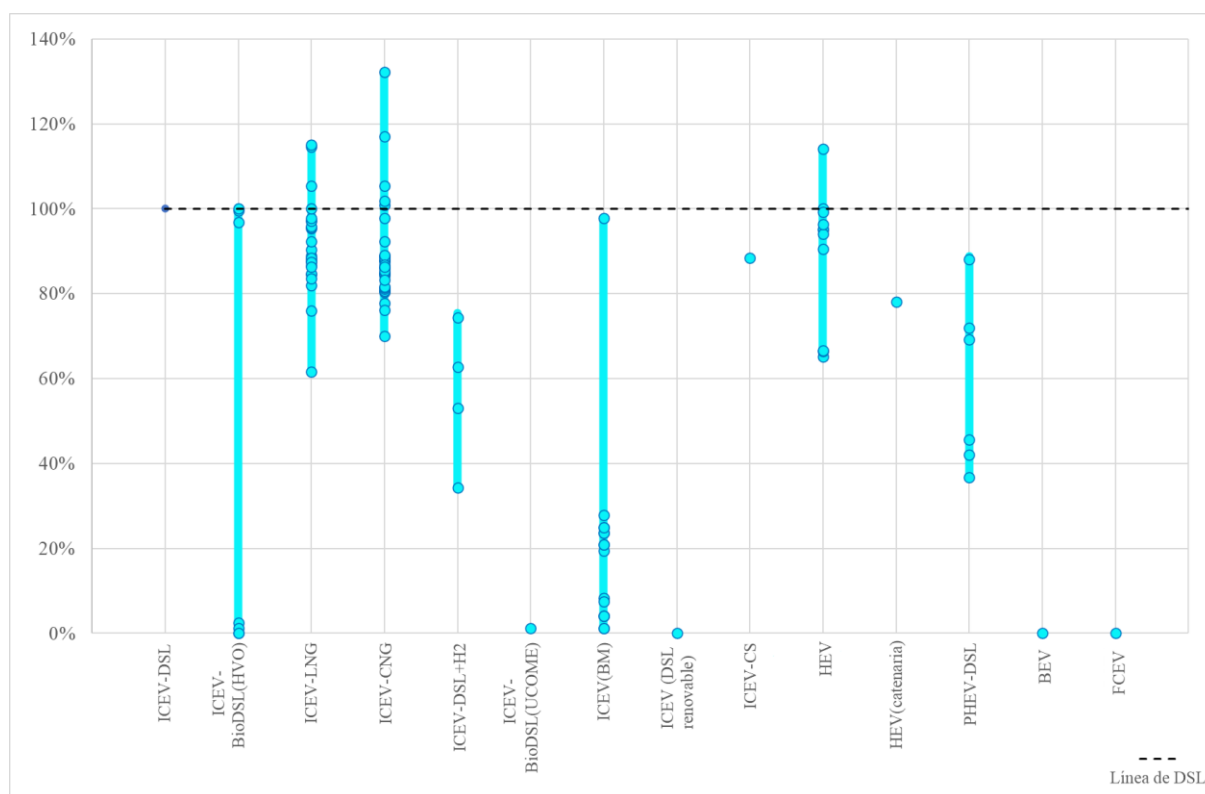
TECNOLOGÍA	ARTÍCULOS REVISADOS
ICEV-DSL	31
ICEV-DSL+H <sub>2</sub>	2
ICEV-BioDSL(HVO)	6
ICEV-LNG	15
ICEV-CNG	10
ICEV-BioDSL(UCOME)	1
ICEV-Biometano	4
ICEV-DSL renovable	1
ICEV-Combustible sintéticos	1
HEV	7
HEV-Catenaria	1
PHEV-DSL	4
BEV	19
FCEV	15



**Figura 24.** Impacto de la fase TTW para cada tecnología de propulsión considerada según la fuente energética empleada en unidades g CO<sub>2</sub> eq/tkm. Fuente: Elaboración propia a partir de las referencias de la **Tabla 6** y la **Tabla 8**

La **Figura 25** destaca que tanto la tecnología BEV como la tecnología FCEV tienen un impacto del 0% en la fase TTW. Esto se debe a que no utilizan combustibles fósiles, eliminando así las emisiones directas de GEI asociadas con la combustión de dichos combustibles.

En cuanto a los combustibles fósiles, el LNG presenta un impacto en la fase TTW que oscila entre el 62 y el 115%, mientras que el CNG muestra un impacto entre el 70 y el 132% en comparación con el diésel. Por lo general, las emisiones de estos combustibles fósiles son inferiores en la fase TTW, ya que, según (MITECO, 2021), “*El gas natural es el combustible fósil con menor impacto medioambiental de todos los utilizados, tanto en la etapa de extracción, elaboración y transporte, como en la fase de utilización*”. Pero existen excepciones, ya que en general el gas natural reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> respecto a la gasolina, pero las incrementa respecto al diésel.



**Figura 25.** Comparación relativa de las emisiones de GEI durante la fase TTW de las tecnologías de propulsión estudiadas frente al diésel. Fuente: Elaboración propia a partir de las referencias de la **Tabla 6** y la **Tabla 8**

Según EC (2020) en un escenario futurista para 2050, las emisiones TTW para vehículos que emplean CNG y LNG pueden ser más elevadas que las del diésel. Esto se debe a que los motores de gas natural son menos eficientes y consumen más energía debido a la menor densidad energética del gas, especialmente en motores de encendido por chispa. Además, estos motores pueden generar cantidades significativas de metano no quemado, un GEI más potente que el CO<sub>2</sub>.

Adicionalmente, Keogh et al. (2024) indican que un vehículo pesado de transporte de mercancías de gas natural con motor de encendido por chispa (“spark-ignition”, SI), en la fase TTW puede emitir en un rango de 644-876 g CO<sub>2</sub> eq/km mientras que el mismo vehículo empleando diésel puede emitir en un rango de 650-831 g CO<sub>2</sub> eq/km. Esto se debe principalmente a que los motores de CNG y LNG, especialmente los SI, a menudo son menos avanzados en términos de eficiencia comparados con los motores diésel.

En el mismo artículo, también realizan el análisis de fuentes energéticas como el BioCNG y el BioLNG que presentan un impacto en la fase TTW de entre el 0,04 y el 8% respecto al diésel (incluyendo las absorciones); una mezcla de gas natural y diésel en las proporciones (60/40) la

cual presenta un impacto de entre el 90 y el 95%; y, por último, una mezcla de BioLNG y diésel en la cual presenta un impacto de entre el 1 y el 50%.

En el caso de los biocombustibles y los combustibles sintéticos, se esperaría que las emisiones en la fase TTW fueran similares a las del diésel, ya que las emisiones neutras se consideran en la fase WTT. Sin embargo, como se explicó en el apartado **4.2.1**, esto no es así en todas las investigaciones, ya que algunos consideran las emisiones neutras en la fase TTW, como se muestra en la **Figura 25**.

En el caso del biodiésel, el rango de impacto en la fase TTW oscila entre el 0 y el 100%, ya que en Nordelöf et al. (2019); Gustafsson & Svensson (2021) y Lyng & Brekke (2019) las emisiones de la fase del TTW se consideran neutras al incluir el proceso de absorción, cuando realmente se deberían considerar en la fase WTT. En realidad, las emisiones de la fase WTT para el biodiésel son superiores a las del diésel convencional en estos artículos, como se observa en la **Figura 25**, lo que compensa el impacto positivo en la fase TTW. Lo mismo ocurre para el biodiésel UCOME y el diésel renovable, que presentan un impacto del 0% respecto al diésel en la fase TTW. Esto se debe a que Lyng & Brekke (2019) considera las emisiones neutras en la fase TTW para el UCOME, y Alonso-Villar et al. (2022) hacen lo mismo para el diésel renovable.

El biometano también muestra una gran variabilidad en su impacto, desde el 0 hasta el 98%. El valor del rango superior proviene de Mojtaba Lajevardi et al. (2019), donde las emisiones negativas se consideran en la fase WTT.

En cuanto a los combustibles sintéticos, el impacto obtenido de GREET (ANL, 2020) es del 88%. Esto indica que la reducción no es significativa ya que las emisiones totales de este combustible sintético son mayores que las del diésel debido al impacto en la fase WTT. Esto se debe a que el modelo GREET analiza el DME (dimetil éter) como combustible sintético, que puede producirse a partir de gas natural o de materias primas renovables, como el gas de vertedero o el gas natural renovable obtenido de flujos de residuos de estiércol u otra biomasa (U. Lee et al., 2016). El impacto evaluado proviene de DME producido a partir de gas natural, lo que explica por qué en este caso el impacto total es similar al del diésel. En la sección **4.5**, que se estudia el impacto total, es decir la suma del impacto del CVV + CVFE, se incluye un artículo en el cual el combustible sintético se produce a partir de biomasa, por lo que se puede observar mejor la reducción del impacto total que puede significar su uso.

Otra fuente energética estudiada para la tecnología ICEV es el DSL+H<sub>2</sub>, cuyo impacto en comparación con el diésel varía entre el 34 y el 74%. Esta variabilidad se debe al porcentaje de H<sub>2</sub> incluido en la mezcla con el diésel. En El Hannach et al. (2019), se muestra que con una proporción de H<sub>2</sub> del 30%, el impacto es del 72%, y al aumentar la proporción de H<sub>2</sub> al 50%, el impacto se reduce aún más, hasta el 54%. Además, esta fuente energética presenta ventajas significativas: el hidrógeno utilizado es hidrógeno residual, se puede emplear el mismo motor que se usa para el diésel, y al utilizar la mezcla como combustible, se incrementa la eficiencia del proceso de combustión al mismo tiempo que se reducen las emisiones de partículas dañinas del escape.

La **Figura 25** muestra que las emisiones para HEV se encuentran entre el 65 y el 114%. El impacto del 114% respecto al diésel proviene de Alonso-Villar et al. (2022), que analizan un camión en dos escenarios: en el primero, un camión de reparto que solo circula en la ciudad de Reikiavik y emplea principalmente su modalidad eléctrica, resultando en un impacto inferior al del diésel (95%); y en el segundo, un camión que realiza trayectos regionales a mayores velocidades, usando más el motor de combustión interna y superando el impacto del diésel (114%).

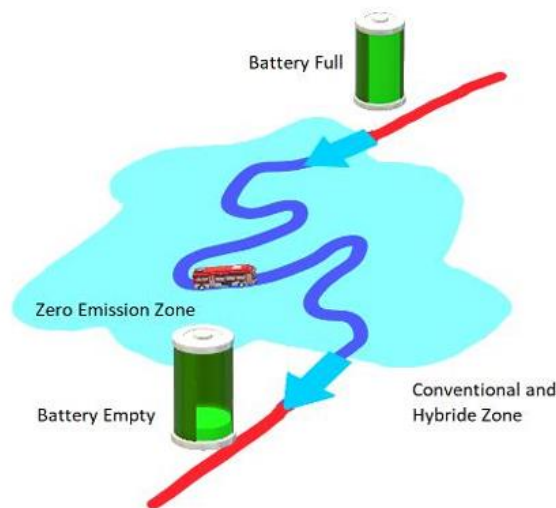
En ciclos de entrega regionales, donde los vehículos operan a velocidades más constantes y altas, la ventaja de la hibridación se reduce significativamente, ya que el motor de combustión interna se usa más extensivamente y la regeneración de energía es menos efectiva. El valor del impacto inferior proviene de Iyer et al. (2023), en el cual el vehículo pesado realiza ciclos de conducción urbana, donde los beneficios de los HEV son más evidentes, maximizando el uso del motor eléctrico y la regeneración de energía.

Otra modalidad de la tecnología híbrida es el uso de una catenaria. En este caso, como se observa en la **Figura 25**, el impacto en la fase TTW respecto al diésel es del 78%. Este valor proviene de Hanesch et al. (2022) que destaca su ventaja frente a los camiones diésel debido al menor uso de diésel durante el transporte. Sin embargo, el principal problema de esta tecnología radica en las emisiones asociadas a la infraestructura, lo que hace que las emisiones totales sean mayores que las del diésel. Por otro lado, las emisiones también dependen en gran parte de cómo se genere la energía eléctrica empleada por esta tecnología.

Finalmente, para la tecnología PHEV, se observa una variabilidad en el impacto de la fase TTW del 37 al 88%. Estos resultados son coherentes, ya que las emisiones en esta fase son menores debido a que los PHEV pueden funcionar en modo totalmente eléctrico durante ciertos periodos,

especialmente en trayectos cortos y a bajas velocidades, reduciendo significativamente el uso del motor de combustión interna y, por ende, las emisiones de GEI.

El valor del rango inferior proviene de Syed et al. (2019), que estudia un autobús de pasajeros que realiza rutas urbanas, caracterizadas por frecuentes paradas y velocidades que no superan los 60 km/h, utilizando únicamente el modo eléctrico en zonas de no emisiones, como se muestra en la **Figura 26**. El valor del rango superior proviene del EC (2020), que analiza las emisiones de un vehículo pesado a partir del año 2020 y en adelante. En 2020, se supone que el vehículo pesado puede recorrer menos de 40 km en modo eléctrico antes de agotar la batería. Para 2030, este valor aumenta a unos 70 km. Por esta razón, el impacto es del 88% en 2020, disminuyendo al 69% más adelante.



**Figura 26.** Funcionamiento dual de un PHEV indicando la zona de cero emisiones en modalidad eléctrica.  
Fuente: Syed et al. (2019)

### 4.3.2 Análisis del informe JEC

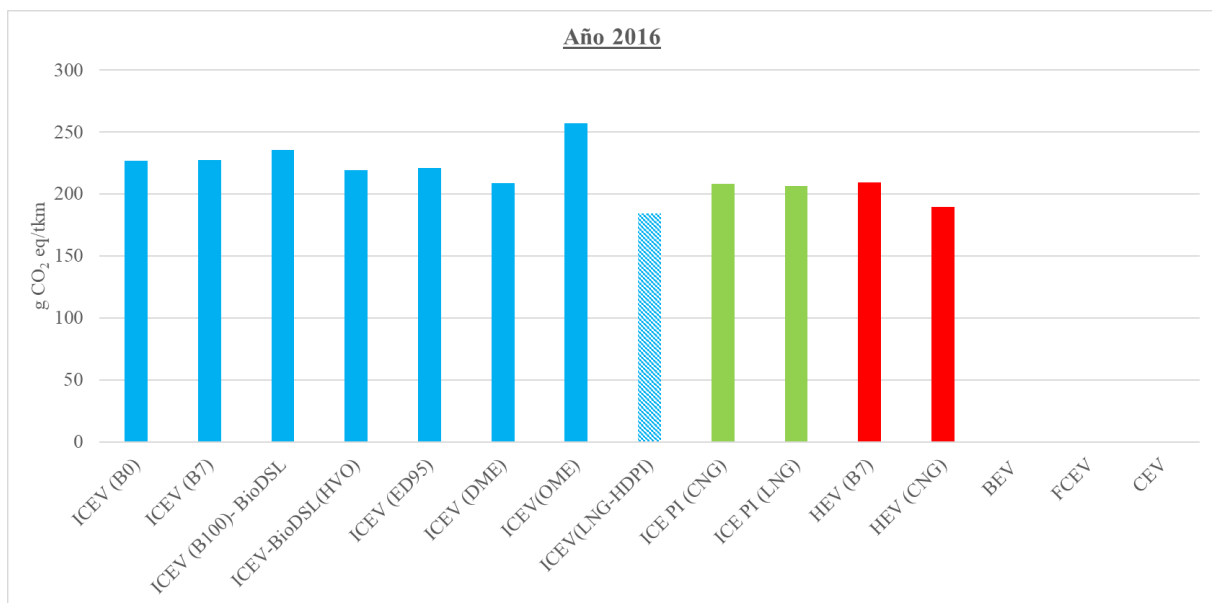
Dentro del informe del JEC (Prussi et al., 2020), esta sección analiza la fase TTW, enfocándose en el consumo de combustible, las emisiones de CO<sub>2</sub> y equivalentes de CO<sub>2</sub>, así como el consumo de energía de vehículos pesados tanto actuales como futuros. Se evalúan dos configuraciones de vehículos pesados:

- Camión rígido de 18 toneladas para entrega regional.
- Combinación de tractor-semirremolque de 40 toneladas para transporte de larga distancia.

Para cada uno de estos vehículos, se examinan los ICEV y sistemas de propulsión electrificados utilizando diversos tipos de combustibles, como diésel, GNL y electricidad, entre otros. La

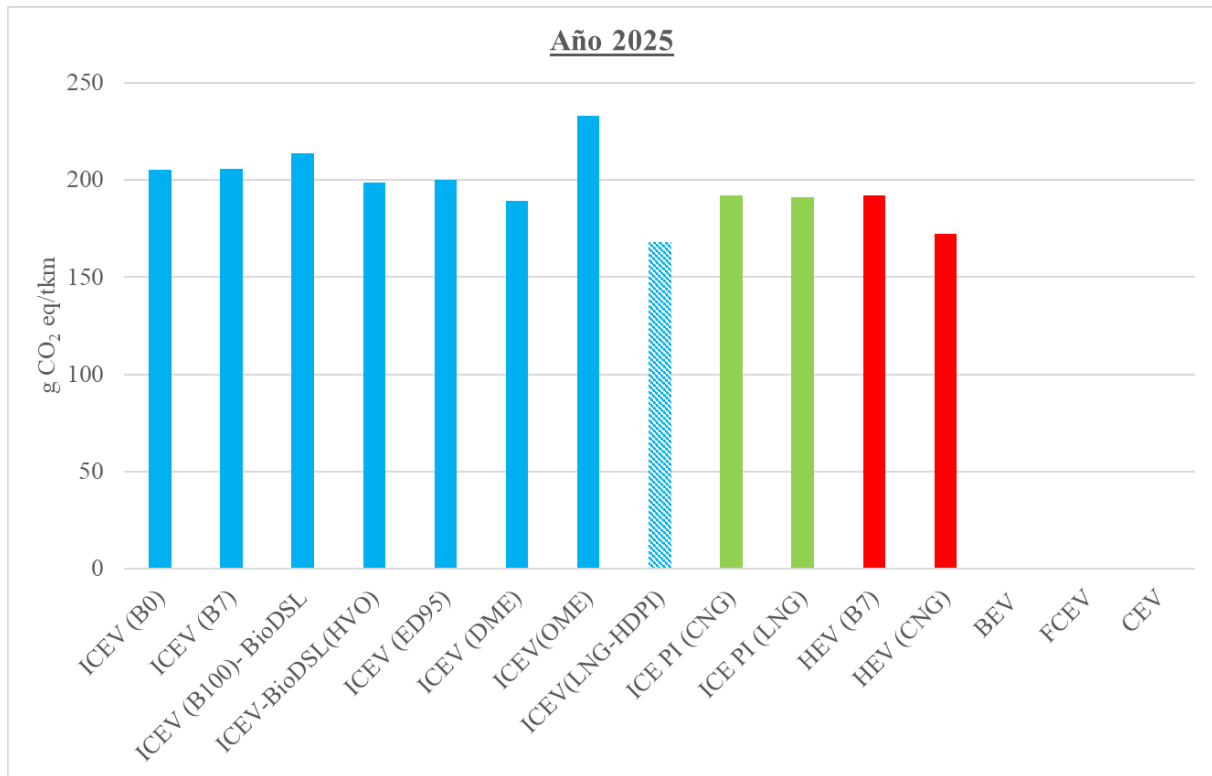
investigación abarca dos periodos: los vehículos del año modelo 2016, que representan el estado del arte actual, y los vehículos del año modelo 2025, que se basan en una proyección de mejoras tecnológicas futuras.

En la **Figura 27** y en la **Figura 28**, se muestran los resultados obtenidos en la fase TTW en g CO<sub>2</sub> eq/tkm para los años 2016 y 2025 respectivamente. Lo primero que se observa en ambas figuras es que, tanto para los BEV como para los FCEV, las emisiones son nulas ya que, por definición, no tienen emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub> en la fase TTW.



**Figura 27.** Emisiones de GEI en g CO<sub>2</sub> eq/tkm de un camión rígido en la fase TTW para las tecnologías estudiadas en el informe JEC para el año 2016. Fuente: Elaboración propia a partir de Prussi et al. (2020)





**Figura 28.** Emisiones de GEI en g CO<sub>2</sub> eq/tkm de un camión rígido en la fase TTW para las tecnologías estudiadas en el informe JEC para el año 2025. Fuente: Elaboración propia a partir de Prussi et al. (2020)

En la **Figura 27**, los ICEV mono combustible representados en azul, muestran varias emisiones clave. El HVO registra emisiones de 219,5 g CO<sub>2</sub> eq/tkm, aproximadamente un 4% menos que el diésel B7. Las emisiones varían entre 209,1 g CO<sub>2</sub> eq/tkm para vehículos que usan DME y 257,0 g CO<sub>2</sub> eq/tkm para los que usan OME, representando un rango de -8 a +13% en comparación con el diésel B7. El B100 (biodiésel puro) muestra emisiones de 235,7 g CO<sub>2</sub> eq/tkm, un 4% más que el diésel B7. El ED95 (95% de etanol con aditivos) tiene emisiones de 220,9 g CO<sub>2</sub> eq /tkm, un 3% menos que el diésel B7.

En la **Figura 28**, los datos para el año 2025 proyectan mejoras en la eficiencia y reducciones en las emisiones de GEI para todas las fuentes de energía debido a avances tecnológicos. Se espera que las emisiones del diésel B7 mejoren en un 10% respecto a 2016. El HVO continuará reduciendo sus emisiones respecto al 2016 en un 10%. El DME seguirá mostrando una reducción significativa en las emisiones de GEI y se espera que en 2025 reduzca sus emisiones en un 11%. El OME, aunque sigue siendo más alto que otros combustibles, se proyecta una mejora respecto a 2016 de alrededor del 11%. El B100 también se beneficiará de avances tecnológicos, reduciendo en un 10% sus emisiones. El ED95 reducirá tan solo un 5% sus emisiones.

En 2016, los vehículos con GNL-HPDI representados en un relleno rallado azul, registraron emisiones de 184,2 g CO<sub>2</sub> eq/tkm, un 19% menos que el diésel B7, gracias a la alta cantidad de gas natural quemado con eficiencias de motor similares a las del motor diésel. Los motores PI representados en verde mostraron emisiones de 208,0 g CO<sub>2</sub> eq/tkm para CNG y 206,7 g CO<sub>2</sub> eq/tkm para LNG, lo que representa un 9% menos que el diésel B7, debido al menor contenido de carbono de los combustibles de gas natural, compensando la menor eficiencia energética.

Para 2025, se espera que los vehículos con GNL-HPDI reduzcan sus emisiones a 167,9 g CO<sub>2</sub> eq/tkm, una disminución del 26% respecto al diésel B7 de 2016, gracias a mejoras en la tecnología de inyección y la eficiencia del motor. Los motores PI proyectan emisiones de 192,2 g CO<sub>2</sub> eq/tkm para CNG, aproximadamente un 10% menos que el CNG de 2016. Para LNG, las emisiones proyectadas para 2025 son de 191,0 g CO<sub>2</sub> eq/tkm, una reducción del 8% en comparación con 2016, en ambos casos impulsado por mejoras tecnológicas en la eficiencia energética y la reducción del contenido de carbono.

Finalmente, los HEV representados en rojo, tal y como muestra la **Figura 27** y la **Figura 28** presentan una reducción tanto para el año 2016 como para el año 2025 del 7% respecto al B7. La emisiones que presenta el HEV en el año 2025 respecto al año 2016 se han reducido en un 9%. Si se emplea CNG como combustible en vez de B7, presenta una mejora ya que en este caso la reducción frente al diésel es del 16% para el año 2016 y de un 14% en el año 2025. Si se comparan las emisiones del CNG en ambos años, se observa una reducción del 10%.

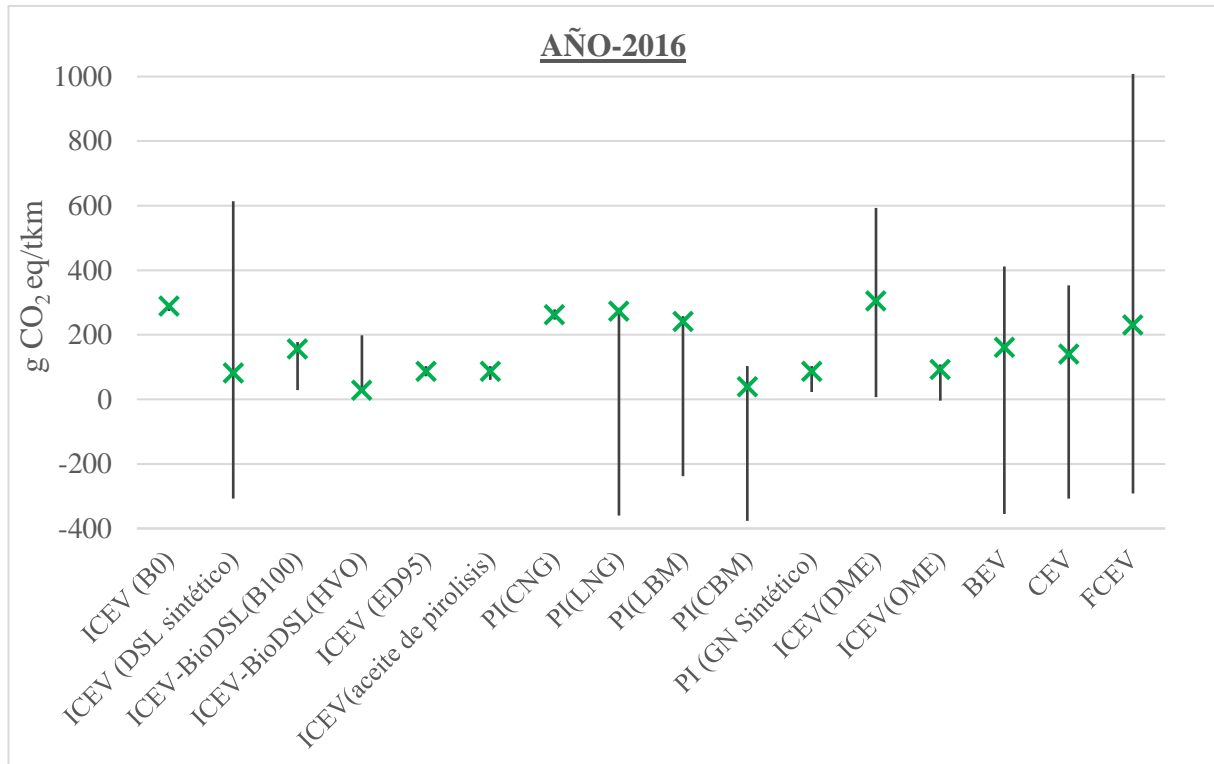
#### **4.4. Ciclo de vida completo de la fuente energética (WTW)**

Anteriormente, se han analizado por separado las fases WTT y TTW. A continuación, se realiza un análisis de la fase WTW, que engloba ambas fases previamente mencionadas. Esto abarca desde la extracción y producción de la fuente de energía hasta las emisiones directas en la fase de uso de dicha fuente energética.

##### **4.4.1. Análisis del JEC**

El documento "Well-to-Wheels Analysis - JEC WTW v5" de Prussi et al. (2020), proporciona una evaluación exhaustiva del uso de energía y las emisiones de GEI de la fase WTW para una variedad de combustibles y trenes motrices futuros. La versión 5 del informe amplía el análisis

a los vehículos pesados, específicamente los camiones rígidos utilizados en misiones de entrega regional y las combinaciones de tractores y semirremolques para transporte de larga distancia.



**Figura 29.** Análisis de las emisiones de la fase WTW de un camión rígido perteneciente al grupo 4 en g CO<sub>2</sub> eq/tkm para diversas tecnologías de propulsión y fuentes energéticas para el año 2016. Se representa tanto la variabilidad de las emisiones según el método de obtención de la fuente energético, como la ruta de obtención seleccionada, marcada con una cruz verde. Fuente: Elaboración propia a partir de Prussi et al. (2020)

En la **Figura 29**, se presentan las emisiones de GEI para cada una de las fuentes energéticas estudiadas en el JEC, según el tipo de tecnología de propulsión. Esta evaluación analiza múltiples trayectorias para obtener cada fuente energética, lo que se refleja en la variabilidad del gráfico. La ruta representativa es seleccionada por consenso dentro del JEC como ejemplo de una de las rutas comercialmente disponibles, dependiendo del caso (por ejemplo, la más frecuente en Europa o con mayor participación en la mezcla energética actual). Las rutas seleccionadas para cada fuente energética se pueden observar en la **Tabla 10**.

**Tabla 10.** Ruta seleccionada como representativa para cada una de las fuentes energéticas analizadas en el JEC. Fuente: Elaboración propia a partir de Prussi et al. (2020).

FUENTE ENERGÉTICA	RUTA SELECCIONADA
Diésel	Diésel convencional producido y utilizado en la UE

Diésel sintético	Producido a partir de residuos de biomasa
Biodiésel (B100)	Producido a partir de aceite de colza
Biodiésel (HVO)	Producido a partir de residuos de grasas animales y aceites vegetales
ED95	Producido a partir de residuos de biomasa
Aceite de pirólisis	Producido a partir de residuos de biomasa
CNG	Producido a partir de gas natural convencional
LNG	Producido a partir de gas natural convencional
Biometano comprimido (CBM)	Producido a partir de biogás (residuos agrícolas)
Gas natural sintético	Producido a partir de residuos de biomasa
Dimetil éter (DME)	Producido a partir de gas natural
Oximetileno éter (OME)	Producido a partir de residuos de biomasa
Electricidad	Electricidad producida a partir de la mezcla energética promedio de la UE para 2016 y proyectada para 2025+
H <sub>2</sub>	Producido a partir de gas natural y utilizado en celdas de combustible

En la **Figura 29**, se observa que el diésel convencional registra altos niveles de emisiones de GEI, aproximadamente 290 g CO<sub>2</sub> eq/tkm. Por otro lado, el diésel sintético, el biodiésel y el HVO muestran emisiones considerablemente más bajas: 82, 157 y 28 g CO<sub>2</sub> eq/tkm respectivamente, reflejando una notable reducción, especialmente en el caso del HVO. Sin embargo, se observa una variabilidad considerable para el diésel sintético ya que existen distintas rutas para su obtención, alguna de ellas más intensivas en carbono que el propio diésel y rutas como la de Fischer-Tropsch a partir de residuos de madera con CCS, la cual presenta emisiones negativas.

Tanto el combustible ED95, una mezcla de etanol y diésel, como el diésel basado en aceite de pirólisis, exhiben un desempeño superior al B100, con emisiones cercanas a 87 g CO<sub>2</sub> eq/tkm. Los combustibles derivados de gas natural, tanto comprimido como licuado, presentan emisiones moderadamente altas, alrededor de 270 g CO<sub>2</sub> eq/tkm, inferiores al diésel, pero superiores a los biocombustibles. En el caso del LNG, se observa que el límite bajo del rango de emisiones es muy negativo; esto se debe a la inclusión de biometano licuado producido a partir de biogás de residuos orgánicos, con emisiones negativas.

El camino seleccionado para la obtención de CBM, aunque no ofrece las emisiones más bajas, ha sido seleccionado debido a su alta disponibilidad potencial de materias primas para 2030, respaldada por iniciativas en curso en Europa, presentando emisiones de 39 g CO<sub>2</sub> eq/tkm; una considerable mejora frente al diésel. La ruta que podría generar las emisiones más negativas sería la producción del CBM a través del estiércol líquido con almacenamiento cerrado.

El gas natural sintético muestra emisiones similares a las del B100, pero podrían reducirse aún más si se obtuviera a partir de electricidad renovable y CO<sub>2</sub> de gases de combustión. El uso del DME como fuente energética genera 305 g CO<sub>2</sub> eq/tkm, un incremento frente al diésel, aunque una ruta alternativa utilizando electricidad renovable y CO<sub>2</sub> de gases de combustión podría representar una gran mejora. El OME muestra una mejora en comparación con el diésel, con emisiones de 92 g CO<sub>2</sub> eq/tkm.

Los BEV y los FCEV presentan una gran variabilidad en sus emisiones, dependiendo exclusivamente de la fase WTT en función de cómo se haya obtenido la fuente energética. Según la ruta seleccionada, ambos muestran una mejora en comparación con el diésel, con emisiones de 162 y 230 g CO<sub>2</sub> eq/tkm, respectivamente. Estas opciones pueden llegar a tener emisiones netamente negativas o cercanas a cero, lo que indica que son alternativas de bajo impacto en términos de GEI, cuando la electricidad proviene de fuentes renovables.

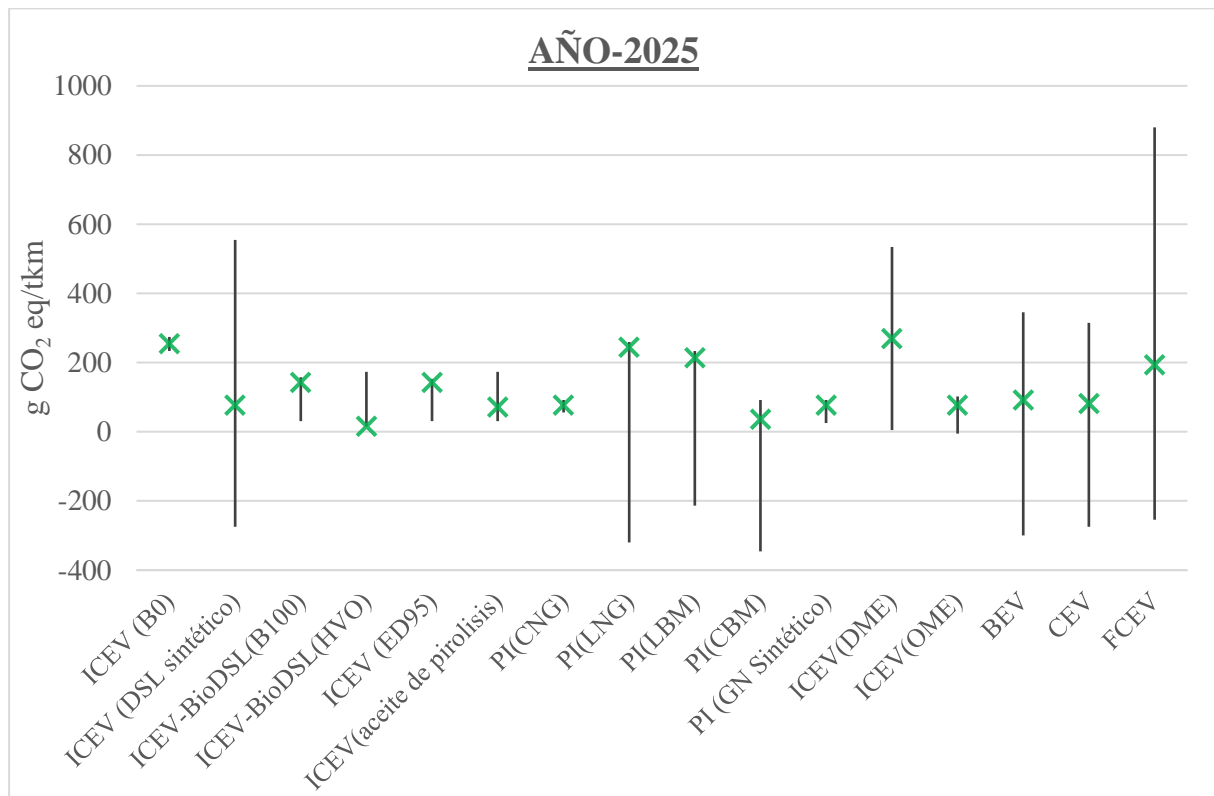
Los resultados proyectados para el año 2025 se muestran en la **Figura 30**. Se anticipan mejoras significativas en la reducción de emisiones de GEI para diversas fuentes energéticas. Las emisiones del diésel convencional disminuyen un 12% debido a avances en la eficiencia del motor y procesos de refinado de bajo impacto. El diésel sintético muestra una reducción del 7%. Tanto el B100 como el HVO experimentan descensos en sus emisiones, con el biodiésel reduciendo un 9% y el HVO un 46%, reflejando mejoras en la producción y uso de residuos de grasas animales y aceites vegetales.

Las emisiones del ED95 aumentaron un 64% respecto a 2016, probablemente debido a cambios en los procesos de producción, la cadena de suministro o las materias primas utilizadas. En contraste, el diésel a partir de aceite de pirólisis muestra una reducción del 19%.

El CNG reduce sus emisiones en un 70%, mientras que el LNG disminuye un 11%. Estas reducciones se deben a mejoras tecnológicas, mayor introducción de biometano, avances en infraestructura y tecnologías de CCS. El DME y el OME, derivados de residuos de biomasa, presentan mejoras significativas, reduciendo sus emisiones un 12 y 17%, respectivamente. El

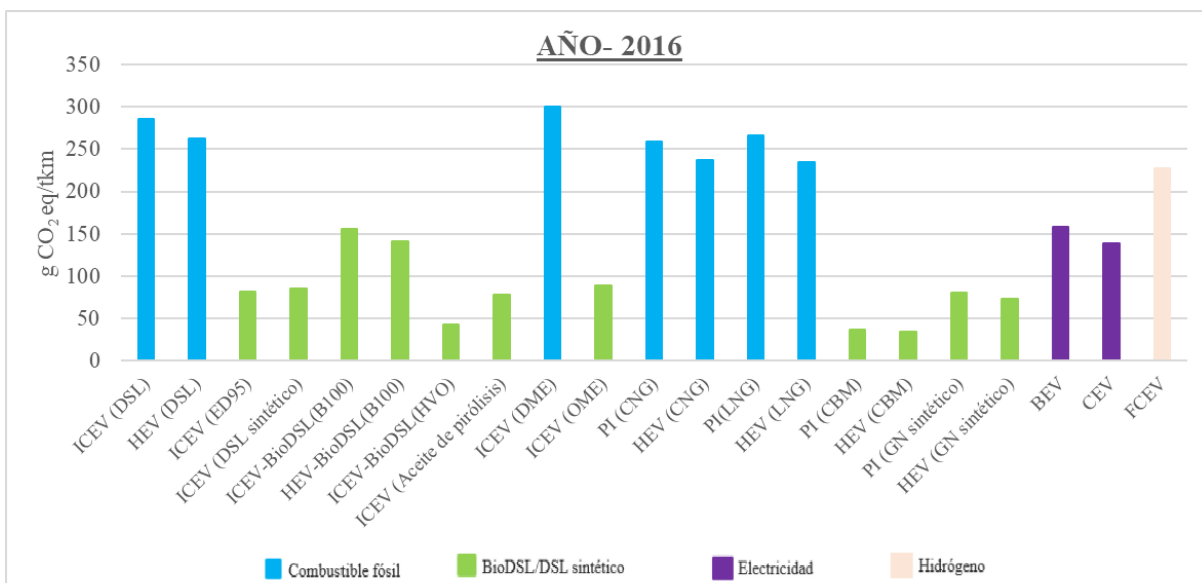
gas natural sintético también muestra una reducción del 12%. Tanto el LBM como el CBM disminuyen sus emisiones en un 12 y 9% respectivamente.

Los BEV presentan una notable reducción en sus emisiones, del 43%. Las emisiones de la electricidad producida a partir del mix energético de generación promedio de la UE para 2016 (110 g CO<sub>2</sub> eq/MJ) se reducen a 74 g CO<sub>2</sub> eq/MJ en 2025, destacando el papel crucial de las energías renovables y las tecnologías avanzadas de CCS en la descarbonización del transporte pesado. Los FCEV también muestran una disminución, aunque menor, del 16%.

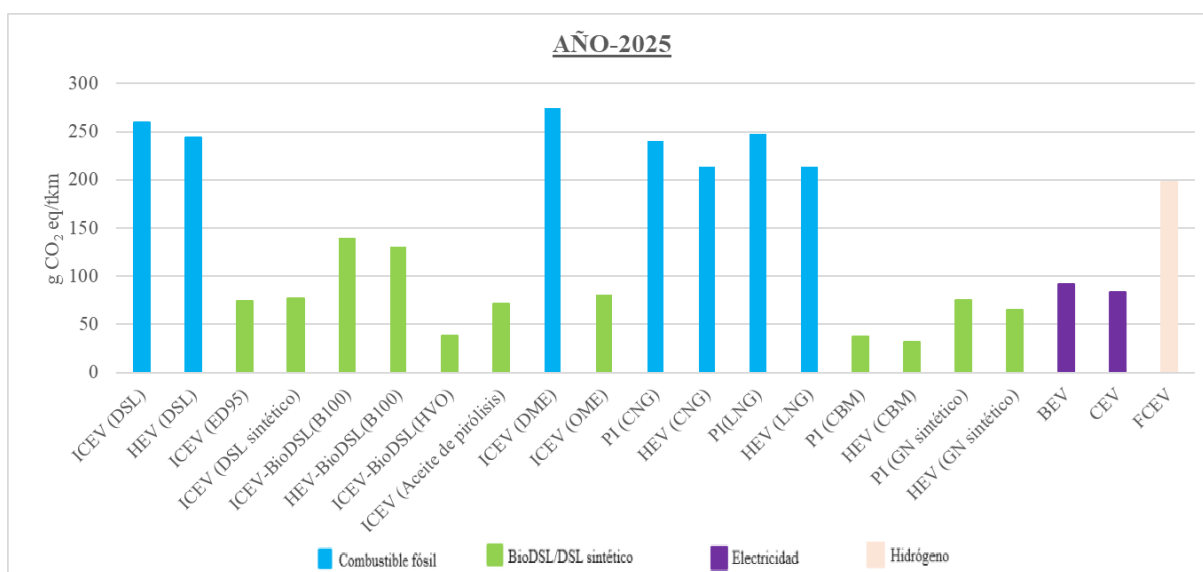


**Figura 30.** Análisis de las emisiones de GEI de la fase WTW de un camión rígido perteneciente al grupo 4 en g CO<sub>2</sub> eq/tkm para diversas tecnologías de propulsión y fuentes energéticas para el año 2025. Se representa tanto la variabilidad de las emisiones según el método de obtención de la fuente energético, como la ruta de obtención seleccionada marcada con una cruz verde. Fuente: Elaboración propia a partir de Prussi et al. (2020)

El informe JEC realiza un segundo análisis, pero esta vez en función del tren motriz y no según la ruta seleccionada para las diversas fuentes energéticas. En la **Figura 31** y la **Figura 32** se pueden observar los resultados obtenidos para los años 2016 y 2025 respectivamente.



**Figura 31.** Análisis de las emisiones de GEI de la fase WTW para el año 2016 de un camión rígido perteneciente al grupo 4 en g CO<sub>2</sub> eq/tkm para diversas tecnologías de propulsión y fuentes energéticas. Se ha realizado la representación según el tipo de fuente energética empleada clasificadas en combustible fósil, combustible bajo en carbono, electricidad e hidrógeno. Fuente: Elaboración propia a partir de Prussi et al. (2020)



**Figura 32.** Análisis de las emisiones de GEI de la fase WTW para el año 2025 de un camión rígido perteneciente al grupo 4 en g CO<sub>2</sub> eq/tkm para diversas tecnologías de propulsión y fuentes energéticas. Se ha realizado la representación según el tipo de fuente energética empleada clasificadas en combustible fósil, combustible bajo en carbono, electricidad e hidrógeno. Fuente: Elaboración propia a partir de Prussi et al. (2020)

Tal y como se observa en la **Figura 31** y la **Figura 32**, en términos generales, la integración de sistemas híbridos en motores de combustión interna se revela como una estrategia efectiva para reducir el consumo de combustible, alcanzando mejoras de hasta un 8%. Respecto a las alternativas similares al diésel, las vías seleccionadas para los combustibles ofrecen reducciones

significativas en las emisiones de GEI para motores PI, desde aproximadamente un 50% hasta un 85% en 2016 (utilizando diésel sintético y biocombustibles).

El sistema HPDI muestra un ahorro energético de cerca del 20% en comparación con los motores CI de diésel tradicionales, lo que se traduce en una disminución de hasta un 11% en las emisiones de GEI en 2016 y hasta un 13% en 2025 en comparación con los motores PI, usando el mismo tipo de combustible. Se prevé que la tecnología de propulsión eléctrica, experimente mejoras sustanciales hacia 2025, lo que, junto con la descarbonización de la electricidad, podría resultar en reducciones significativas en las emisiones de GEI. Sin embargo, como se ha mencionado previamente, el impacto real de la electrificación varía según el país.

De todas las combinaciones de combustibles/transportadores de energía y trenes motrices explorados en el informe JEC, la ruta menos intensiva en GEI es la del HVO con tecnología PI (utilizando residuos como materia prima) y el uso de CBM en un híbrido PI.

### **4.5. Análisis del ciclo de vida completo**

Finalmente, ahora que se han analizado individualmente cada una de las fases del ciclo de vida (CVV, WTT, TTW, WTW), es crucial integrar estos resultados para obtener una visión global del impacto de las diferentes tecnologías de propulsión y fuentes de energía. Este apartado realiza un análisis del ciclo de vida completo para cada una de las tecnologías estudiadas, permitiendo una comparación detallada de sus emisiones de GEI desde la extracción de materias primas hasta la disposición final del vehículo.

#### **4.5.1. Revisión bibliográfica**

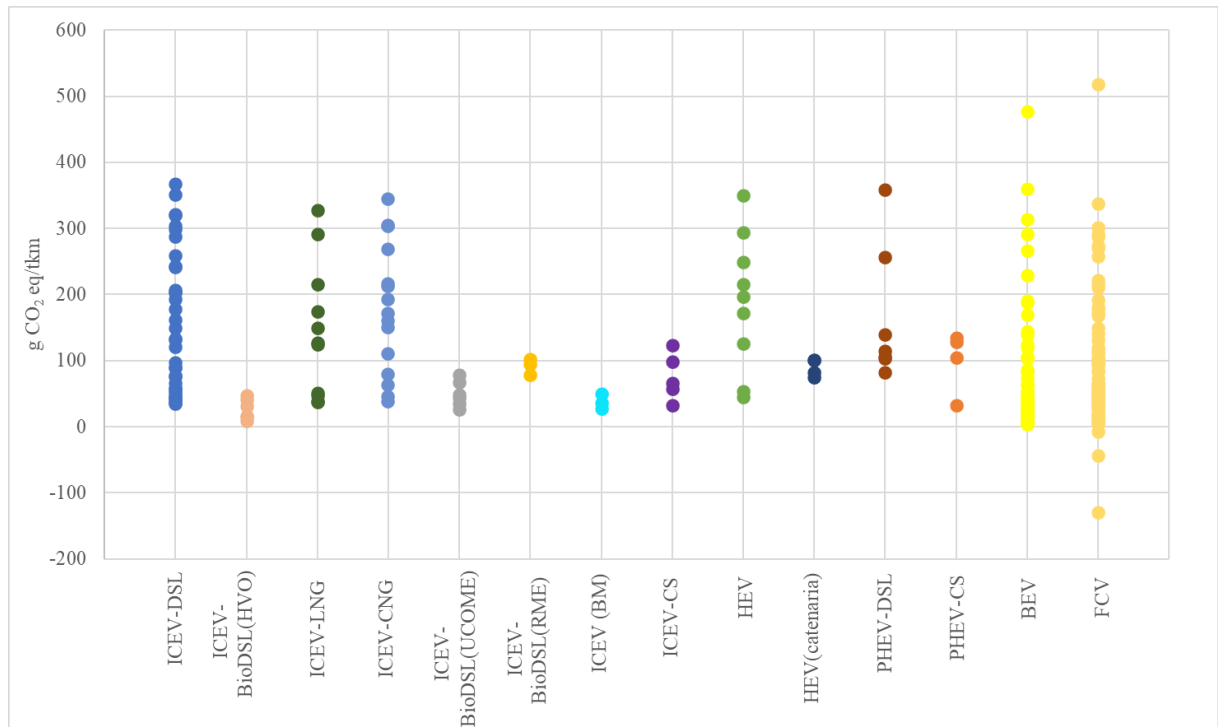
En esta sección, se han revisado todos los artículos que proporcionaban datos para las tres fases del ciclo de vida: CVV, WTT y TTW. Se observa que la fase con mayor cantidad de artículos disponibles es la WTW (WTT+TTW). Por lo tanto, para evaluar el impacto total del ciclo de vida, se han utilizado todos los artículos listados en la **Tabla 4**, que son los analizados para la fase CVV además de los incluidos en la **Tabla 11**.



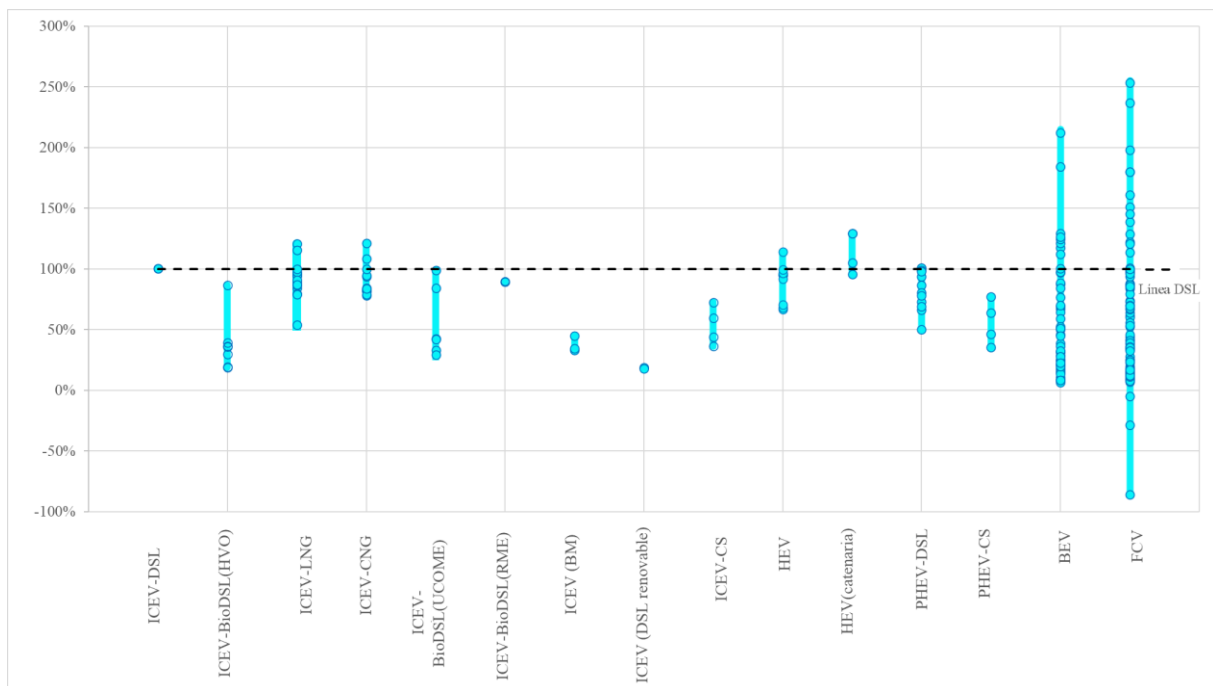
**Tabla 11.** Estudios adicionales empleados en el análisis de la fase del WTW. Fuente: Elaboración propia

ESTUDIO / ARTÍCULO	REFERENCIA	ÁMBITO GEOGRÁFICO
Greenhouse Gas Emissions Performance of Electric, Hydrogen and Fossil-Fueled Freight Trucks with Uncertainty Estimates. Using a Probabilistic Life-Cycle Assessment (pLCA)	Smit et al., 2024	Australia
Life cycle assessment of construction and driving operation of a hydrogen-powered truck built from a used diesel truck	Drawer et al., 2024	Alemania

En la **Figura 33** se presentan las emisiones de GEI en unidades absolutas de g CO<sub>2</sub> eq/tkm para todos los artículos recopilados en la **Tabla 4** y la **Tabla 11**. Esta representación gráfica permite observar la variabilidad en las emisiones entre las distintas tecnologías. Factores como el tipo de vehículo, la carga transportada, el kilometraje y los contextos geográficos influyen en estos valores. Debido a esta variabilidad, no es posible establecer un rango consistente de emisiones absolutas para los vehículos pesados, complicando las comparaciones. Por ello, se adopta un enfoque en el que se comparan las emisiones de diversas tecnologías empleando unidades relativas, como se detalla en los apartados **4.1.1**, **4.2.1** y **4.3.1**, con el fin de lograr un análisis más preciso.



**Figura 33.** Impacto del ciclo de vida total para cada tecnología de propulsión considerada según la fuente energética empleada. Fuente: Elaboración propia a partir de las referencias de la **Tabla 4** y la **Tabla 11**



**Figura 34.** Comparación relativa de las emisiones de GEI durante todo el ciclo de vida de todas las tecnologías de propulsión estudiadas frente al diésel. Fuente: Elaboración propia a partir de las referencias de la **Tabla 4** y la **Tabla 11**

En la **Figura 34** se observa que los combustibles fósiles, como el LNG y el CNG, muestran un rango de emisiones que va del 80 al 120% respecto al diésel, mientras que el CNG tiene un rango del 78 al 121%. En términos generales, el uso de estas alternativas fósiles resulta en una ligera mejora de aproximadamente un 10% en comparación con el diésel. El valor superior del rango de emisiones tanto para el LNG y el CNG se basa en EC (2020), donde se proyecta una situación hipotética para el año 2050. Según esta proyección, el diésel muestra menores emisiones en la fase TTW debido a la mayor eficiencia energética de sus motores, los avances tecnológicos previstos y los sistemas mejorados de control de emisiones. Sin embargo, los combustibles gaseosos pueden presentar desventajas relacionadas con la combustión y posibles fugas de metano.

Todos los biocombustibles, incluyendo el HVO, el UCOME y el RME, muestran reducciones en las emisiones en comparación con el diésel. El HVO, por ejemplo, presenta emisiones que oscilan entre el 19 y el 87% respecto al diésel. El valor superior del rango proviene de ANL (2020), donde se analiza el biodiésel producido a partir de residuos de soja y se compara con el biodiésel derivado de residuos forestales, el cual muestra una reducción del 30% respecto al diésel. La diferencia en las emisiones entre el biodiésel de residuos de soja y el de residuos forestales se debe principalmente a factores asociados con el uso del suelo y los métodos de producción. Los residuos de soja, al ser subproductos de la agricultura, están asociados con emisiones adicionales provenientes del cambio de uso del suelo y las prácticas agrícolas, las cuales incluyen la liberación de carbono almacenado en el suelo y la vegetación. Por otro lado, los residuos forestales generalmente no implican cambios significativos en el uso del suelo y su recolección tiende a ser menos intensiva en términos de emisiones, lo que resulta en un perfil de emisiones de carbono más bajo para el biodiésel producido a partir de estos residuos (Castanheira et al., 2015).

En la **Figura 34** también se observa que el UCOME muestra una mayor reducción de emisiones en comparación con el RME, con valores que varían entre el 29 y el 100%, mientras que el RME presenta emisiones equivalentes al 90% del diésel. van den Oever et al. (2023), que proporciona el valor del rango superior para el RME y establece que las emisiones del UCOME son un 70% menores que las del diésel, no detalla la razón por la cual el RME emite más que el UCOME. Esta diferencia podría estar relacionada con el hecho de que el RME se produce generalmente a partir de cultivos agrícolas como la colza, lo que implica un uso intensivo de tierras agrícolas y otros recursos asociados con la agricultura intensiva. Esto podría conllevar

la generación adicional de GEI durante las fases de cultivo, cosecha y procesamiento de la materia prima (Gupta et al., (2022).

Un aspecto notable de las emisiones del UCOME es el rango superior de emisiones, el cual no muestra ninguna mejora en comparación con el diésel. Este dato se deriva de Lyng & Brekke (2019), donde se obtiene FAME (“fatty acid methyl ester”, éster metílico de ácido graso) a partir de aceite de palma. El artículo señala que el alto impacto ambiental asociado con la producción de biodiésel a base de aceite de palma se debe principalmente al cambio en el uso del suelo. Esto implica que la conversión de tierras, como la deforestación para establecer plantaciones de palma aceitera, tiene efectos negativos significativos en el medio ambiente, incluyendo la pérdida de biodiversidad, la liberación de carbono almacenado en los bosques y otros hábitats naturales, así como la alteración de los ecosistemas locales.

Para ofrecer una mejor visión de la reducción de impacto que puede presentar un combustible sintético, en van den Oever et al. (2023) realizan un análisis completo tanto del CVFE como del CVV y realiza una comparación con el diésel. En este artículo se estudió el REDIFUEL un combustible sintético hecho a partir de astillas de corteza el cual luego se mezcla con un 7% de UCOME. En este artículo se estudian dos escenarios, el SSPS2-base en cual no incluye políticas de protección contra el cambio climático y el caso SSPS2-RCP19 el cual implica políticas para cumplir con el objetivo del Acuerdo de París de limitar el aumento de la temperatura global a un máximo de 1,5 °C. En el primer escenario el impacto total respecto al diésel es del 60% mientras que en el segundo caso se observa una reducción del 44%. En este mismo artículo también se analiza la tecnología PHEV, la cual en la primer situación presenta un impacto total respecto al diésel de 64% y en el caso que se aplican las políticas del cambio climático, las emisiones se reducen a un 46%.

En cuanto al biometano y el diésel renovable, ambos presentan reducciones significativas de CO<sub>2</sub> equivalente en comparación con el diésel. En concreto, el biometano tiene un rango de emisiones de 33-44%, mientras que el diésel renovable presenta un rango de 17-19%. Estos resultados destacan que ambas opciones son alternativas menos contaminantes respecto al diésel convencional.

Otra alternativa para reducir las emisiones de GEI es la mezcla de diésel e hidrógeno, como se propone en El Hannach et al. (2019), donde una combinación del 50% de cada uno puede reducir las emisiones hasta en un 47%.

Los HEV presentan un rango de emisiones entre el 67 y 114%. El valor superior del rango proviene de Alonso-Villar et al. (2022), donde se analiza un vehículo pesado en escenarios de reparto urbano e interurbano. En la situación interurbana, el motor de combustión interna se utiliza predominantemente, y debido a la inclusión del motor eléctrico, las emisiones resultan ser mayores que las del diésel. Es crucial determinar en qué contexto un HEV realmente mejora las emisiones de GEI. Los HEV que utilizan una catenaria presentan emisiones entre el 95 y 135% respecto al diésel, variando según el número de vehículos que emplean esta infraestructura. Según Hanesch et al. (2022), se observan mejoras en las emisiones respecto al diésel cuando la catenaria es utilizada por al menos 365 HEV. Además, en el artículo Nordelöf et al. (2019), un HEV que utiliza HVO en lugar de diésel muestra unas emisiones del 28% respecto al diésel.

Los PHEV tienen un amplio rango de emisiones, entre el 50 y el 100%, principalmente debido al mix energético utilizado para cargar la batería. Si el vehículo utiliza HVO en lugar de diésel, las emisiones se reducen considerablemente. En Nordelöf et al. (2019), se estudian tres casos de mix energético: Suecia, Europa y Estados Unidos, obteniéndose impactos del 23, 40 y 46% respectivamente, al emplear HVO, en comparación con el uso de diésel, que presenta emisiones del 50, 66 y 73% respectivamente.

Los BEV presentan un rango de emisiones del 7-212% respecto al diésel, variando ampliamente según el mix energético empleado. En la fase TTW, las emisiones son nulas, y si el mix energético es bajo en carbono, las emisiones de la fase WTT también serían nulas, quedando solo la fase CVV como contribuyente al impacto total.

Finalmente, los FCEV presentan un rango de emisiones de -86 a 253% respecto al diésel, siendo la tecnología con las emisiones más bajas y altas. Esto depende del método de obtención del hidrógeno en la fase WTT. Por ejemplo, en Antonini et al. (2021), se obtienen emisiones negativas cuando el hidrógeno se produce a partir de biomasa en un proceso con CCS. En contraste, Wang et al. (2022) obtienen hidrógeno mediante electrólisis utilizando el mix energético chino, resultando en el valor superior del rango de emisiones.

#### **4.6. Contribución de las diferentes fases respecto a las emisiones totales**

En esta sección, se analiza la contribución relativa de las distintas fases del ciclo de vida de los vehículos es decir CVV, WTT y TTW respecto el impacto ambiental total.

#### 4.6.1. Contribución de la fase CVV respecto a las emisiones totales

En esta sección, se evalúa la contribución del CVV al impacto total de diferentes tecnologías de propulsión. Para ello, se ha calculado el porcentaje de emisiones atribuidas al CVV en relación con las emisiones totales. Este análisis se realizó tomando como referencia un artículo representativo de un contexto europeo que estudia vehículos pesados comunes.

La **Tabla 12** muestra el porcentaje representativo del impacto del CVV para cada tecnología, junto con su referencia. Es fundamental señalar que, para el estudio de la fase WTW, se utilizaron los mismos artículos para todas las tecnologías. Este método garantiza una comparación justa y precisa entre las tecnologías analizadas.

**Tabla 12.** Contribución del impacto del CVV respecto al impacto total para cada una de las tecnologías estudiadas y el artículo del cual se ha obtenido el valor. Fuente: Elaboración propia

TECNOLOGÍA	CONTRIBUCIÓN DEL IMPACTO DE CVV (%)	ARTÍCULO REPRESENTATIVO
ICEV-DSL	11	EC, 2020
ICEV-BioDSL(HVO)	27	Nordelöf et al., 2019
ICEV-LNG	12	EC, 2020
ICEV-CNG	12	EC, 2020
ICEV-BioDSL(UCOME)	23	Lyng & Brekke, 2019
ICEV-Biometano	32	Lyng & Brekke, 2019
ICEV-DSL renovable	16	Alonso-Villar et al., 2022
ICEV-Combustible sintéticos	26	van den Oever et al., 2023
HEV	12	EC, 2020
PHEV-DSL	15	EC, 2020
PHEV-CS	27	van den Oever et al., 2023
BEV	34	EC, 2020
FCEV	16	EC, 2020

Para la tecnología ICEV que utilizan combustibles convencionales como diésel, LNG y CNG, el impacto del CVV contribuye entre un 11 y un 12% al impacto total. Esto se debe a que la mayoría de las emisiones provienen de la extracción y uso del combustible.

Cuando se emplean biocombustibles como HVO, UCOME, diésel renovable, combustibles sintéticos o biometano, este porcentaje aumenta al 16-32%. Esto se debe a que los biocombustibles absorben y emiten CO<sub>2</sub> de manera equilibrada durante su ciclo de vida. Aunque liberan CO<sub>2</sub> al ser utilizados, este proviene del carbono previamente absorbido por las materias primas (Repsol, 2024) incrementando así la contribución del CVV.

Los combustibles sintéticos, por su parte, se producen mediante electrólisis con electricidad renovable y captura de CO<sub>2</sub>, generando emisiones netas cero. Este proceso cerrado, donde el CO<sub>2</sub> liberado durante la combustión es equivalente al previamente capturado, reduce significativamente las emisiones de GEI (Repsol, 2024). Por ello, el impacto del CVV aumenta su contribución relativa al reducirse las emisiones desde la extracción hasta el uso del vehículo.

Para la tecnología HEV la contribución del CVV es del 12% lo cual es similar a la tecnología ICEV. Por otro lado, la tecnología PHEV presenta una contribución un poco mayor del 15% debido a los elementos adicionales que son necesarios para esta tecnología. Por la misma razón explicada previamente, en el caso en el que se emplean combustibles sintéticos para la tecnología PHEV, la contribución del CVV aumenta hasta un 27%.

Tras realizar la revisión bibliográfica, se ha observado que tanto los BEV como los FCEV muestran una notable variabilidad en cuanto a su contribución del impacto del CVV tiene sobre el impacto total. Según los artículos seleccionados como representativos, la contribución del CVV para los BEV es del 34%, mientras que para los FCEV es del 16%. Al analizar la totalidad de las investigaciones empleados, referenciados en la **Tabla 4**, se ha observado una gran variabilidad en el porcentaje de contribución del CVV tanto para los BEV como para los FCEV.

En el caso de los BEV, se observa una amplia variabilidad en la contribución de impacto del CVV, que oscila entre el 5 y el 100%. Esta variabilidad se explica por el tipo de energía empleada durante la fase del WTT. Cuando se utiliza energía 100% renovable, las emisiones asociadas a la fase de extracción hasta el tanque de almacenamiento se reducen considerablemente, lo que resulta en una contribución del CVV del 100%. Por el contrario, si se emplea una energía intensiva en carbono, las emisiones de esta fase se incrementan notablemente, lo que reduce significativamente la contribución del CVV, incluso hasta un 3%.

En el caso de los FCEV, se observa una situación similar, donde el proceso de obtención de hidrógeno determina la variabilidad en la contribución del impacto del CVV, que puede oscilar entre el 3 y el 80%. Cuando el proceso de obtención de H<sub>2</sub> es intensivo en carbono como el SMR y la gasificación de carbón, las emisiones asociadas son más altas, lo que resulta en un mayor impacto del CVV. Por el contrario, si se emplean métodos de producción de H<sub>2</sub> menos contaminantes, como la electrólisis del agua utilizando energía renovable, el impacto del CVV se reduce significativamente.

#### 4.6.2. Contribución de la fase WTT respecto a las emisiones totales

A continuación, se realiza un análisis de la contribución de las emisiones durante la fase WTT al impacto total de cada tecnología. Para ello, se ha calculado el porcentaje de emisiones atribuidas a esta fase en relación con las emisiones totales. Al igual que en la sección 4.6.1, se ha establecido un valor representativo seleccionando un artículo realizado en un contexto europeo que estudie vehículos pesados comunes. La **Tabla 13** muestra el porcentaje representativo del impacto de esta fase para cada tecnología, junto con su referencia que coincide con las empleadas en la **Tabla 12** para la contribución del CVV. Debido a que para los biocombustibles y los combustibles sintéticos según el artículo las emisiones neutras se consideran en la fase de extracción y distribución o en la fase de conducción, se ha decidido que para estos únicamente se dividirá la contribución en las fases CVV y WTW. Por lo tanto, su análisis se realiza en la sección 4.6.4.

**Tabla 13.** Contribución del impacto del WTT respecto al impacto total para varias de las tecnologías estudiadas y el artículo del cual se ha obtenido el valor. Fuente: Elaboración propia

TECNOLOGÍA	CONTRIBUCIÓN DEL IMPACTO DE WTT (%)	ARTÍCULO REPRESENTATIVO
ICEV-DSL	23	EC, 2020
ICEV-LNG	23	EC, 2020
ICEV-CNG	17	EC, 2020
HEV	22	EC, 2020
PHEV-DSL	28	EC, 2020
PHEV-CS	28	van den Oever et al., 2023
BEV	66	EC, 2020



FCEV	84	EC, 2020
------	----	----------

En la **Tabla 13**, se observa que para la tecnología ICEV con combustibles convencionales, la fase WTT contribuye entre un 17 y 23%, dado que la mayoría de las emisiones provienen de la fase TTW durante la combustión. Los HEV tienen una contribución similar del 22%, mientras que para los PHEV es mayor, con un 28% debido a la diversidad en las fuentes de energía utilizadas para cargar las baterías. La variabilidad para los PHEV oscila entre el 17 y el 85%, influenciada por el mix energético regional; en regiones con alta penetración de energías renovables, la contribución del WTT es menor comparado con aquellas donde predominan los combustibles fósiles.

Para los BEV, la contribución de la fase WTT es aproximadamente del 66%, aunque muestra una gran variabilidad entre el 5 y el 95%. Esta variabilidad depende del mix energético de la red eléctrica regional que determina las emisiones de GEI asociadas a la producción de electricidad.

Para el caso de los FCEV, la contribución de la fase WTT es representativamente del 84%, aunque esta tecnología presenta una gran variabilidad. Al analizar la contribución en todos los artículos presentes en la **Tabla 6**, se observa una variabilidad entre el 0 y el 97%. Esta variabilidad se debe principalmente a las diferentes fuentes y métodos de producción de hidrógeno. Por ejemplo, el valor del 97% proviene de Simons & Azimov (2021), donde el H<sub>2</sub> se obtiene mediante electrólisis a través de una membrana de intercambio de protones (PEM, “Proton Exchange Membrane”). Por otro lado, en el artículo de Antonini et al. (2021), a partir del cual se realizó la

, se observa que la contribución de esta fase puede ser incluso negativo cuando el H<sub>2</sub> se obtiene mediante un proceso de gasificación de biomasa.

#### 4.6.3. Contribución de la fase TTW respecto a las emisiones totales

En este apartado se analiza el impacto de la fase TTW respecto al impacto total del ciclo de vida de los vehículos pesados. La fase TTW incluye todas las emisiones generadas durante la operación del vehículo, específicamente las emisiones de CO<sub>2</sub> y equivalentes de CO<sub>2</sub> resultantes del consumo de combustible y la eficiencia energética.

En la **Tabla 14**, se muestra el porcentaje representativo del impacto de la fase TTW para cada tecnología, junto con su referencia que coincide con las empleadas en la **Tabla 12** y la **Tabla 13** para la contribución del CVV y del WTT respectivamente.

**Tabla 14.** Contribución de la fase TTW respecto al impacto total para varias de las tecnologías estudiadas y el artículo del cual se ha obtenido el valor. Fuente: Elaboración propia

TECNOLOGÍA	CONTRIBUCIÓN DEL IMPACTO DE TTW (%)	ARTÍCULO REPRESENTATIVO
ICEV-DSL	66	EC, 2020
CEV-LNG	65	EC, 2020
ICEV-CNG	71	EC, 2020
HEV	65	EC, 2020
PHEV-DSL	57	EC, 2020
PHEV-CS	46	van den Oever et al., 2023
BEV	0	EC, 2020
FCEV	0	EC, 2020

En la **Tabla 14**, se observa que para la tecnología ICEV, la fase TTW contribuye con más del 60% de las emisiones totales. Esto se debe a la baja eficiencia energética de los motores de combustión interna, el alto contenido de carbono de los combustibles fósiles y las ineficiencias en la combustión. Específicamente, los combustibles fósiles representan un 66% para el diésel, un 65% para el LNG y un 71% para el CNG. El LNG tiende a producir menos emisiones que el CNG debido a su mayor densidad energética y menor contenido de carbono por unidad de energía (Alonso Raposo et al., 2019).

Según el artículo de referencia listado en la **Tabla 14**, en el caso de la tecnología HEV, la fase TTW constituye aproximadamente el 65% de las emisiones totales. Esta tecnología en la fase TTW presenta una gran variabilidad de emisiones ya que los HEV emplean principalmente el modo eléctrico en situaciones de baja velocidad o durante el arranque, que son comunes en entornos urbanos. Sin embargo, en situaciones de reparto interurbano, donde se alcanzan velocidades más altas y hay menos paradas, el motor de combustión es utilizado predominantemente.

Por ejemplo, en el artículo seleccionado para este análisis, se considera un escenario de reparto urbano, lo que explica por qué el valor representativo no es tan elevado. No obstante, otro análisis realizado por ANL (2020) muestra que, en un caso de reparto a largas distancias, la contribución de la fase TTW puede ser del 86%. Esto destaca cómo la naturaleza del uso del vehículo puede influir significativamente en las emisiones durante la fase TTW, siendo más alto en situaciones de reparto interurbano debido al mayor uso del motor de combustión.

El caso de los PHEV guarda similitud con el de los HEV, ya que ambos tienen la capacidad de operar en modo eléctrico, reduciendo así el uso del motor de combustión y, en consecuencia, las emisiones, o en modo híbrido, combinando el uso del motor de combustión y el eléctrico según las necesidades de conducción. Esta flexibilidad en los modos de funcionamiento impacta en las emisiones de GEI durante la fase TTW, ya que el equilibrio entre el uso del motor eléctrico y el de combustión varía en función de las condiciones de conducción. El valor representativo seleccionado representa una contribución de la fase TTW del 57%.

Sin embargo, el aspecto verdaderamente determinante es la contribución de la fase WTT, es decir, el origen de la energía utilizada para cargar las baterías de los PHEV. Si esta energía proviene de fuentes renovables, como la energía eólica o solar, entonces el impacto de las emisiones durante la fase TTW será más significativo, dado que el proceso de recarga no conlleva emisiones directas. Por el contrario, si la energía utilizada proviene en su mayoría de fuentes fósiles, como el carbón o el gas natural, entonces la contribución de la fase WTT será más relevante, ya que las emisiones asociadas a la generación eléctrica aumentarán el impacto ambiental total del vehículo.

Por ejemplo, en Nordelöf et al. (2019) se compara un autobús urbano en diferentes contextos energéticos (Suecia, EE.UU., Europa). En Suecia, donde predominan las energías renovables, las emisiones totales fueron de 47 g CO<sub>2</sub> eq/(persona\*km) y la fase TTW representó el 62%. En contraste, en Europa y EE. UU., con mayor uso de carbón, las emisiones fueron mayores (63 y 68 g CO<sub>2</sub> eq/(persona\*km) respectivamente), y la fase TTW tuvo una contribución menor (46% en Europa y 43% en EE. UU.).

En el caso de la tecnología PHEV que utiliza combustibles sintéticos en lugar de diésel cuando se emplea el motor de combustión, la contribución de la fase TTW se reduce a un 46%. Esto se debe a que las emisiones generadas por la combustión de combustibles sintéticos son inferiores en comparación con las del diésel.

Por último, para el caso de la tecnología BEV y FCEV la contribución de la fase TTW es del 0% ya que estas tecnologías no emiten CO<sub>2</sub> en esta fase.

#### 4.6.4. Contribución de la fase WTW respecto a las emisiones totales

En este apartado se analiza el impacto de la fase WTW respecto a las emisiones totales del ciclo de vida de los vehículos pesados. La fase WTW incluye todas las emisiones generadas desde la producción y suministro del combustible hasta su uso en el vehículo. La **Tabla 15**, muestra el porcentaje representativo del impacto de la fase WTW para cada tecnología, junto con sus referencias, las cuales coinciden con las utilizadas para las contribuciones del CVV, WTT y TTW, respectivamente. Como se mencionó previamente, el análisis de los biocombustibles y combustibles sintéticos se ha dividido únicamente en las fases CVV y CVFE, por lo que se analiza en esta sección.

**Tabla 15.** Contribución de la fase WTW respecto al impacto total para varias de las tecnologías estudiadas y el artículo del cual se ha obtenido el valor. Fuente: Elaboración propia

TECNOLOGÍA	CONTRIBUCIÓN DEL IMPACTO DE WTW (%)	ARTÍCULO REPRESENTATIVO
ICEV-DSL	89	EC, 2020
ICEV-BioDSL(HVO)	73	Nordelöf et al., 2019
ICEV-LNG	88	EC, 2020
ICEV-CNG	71	EC, 2020
ICEV-BioDSL(UCOME)	77	Lyng & Brekke, 2019
ICEV-Biometano	78	Lyng & Brekke, 2019
ICEV-DSL renovable	84	Alonso-Villar et al., 2022
ICEV-Combustible sintéticos	74	van den Oever et al., 2023
HEV	88	EC, 2020
PHEV-DSL	85	EC, 2020
PHEV-CS	46	van den Oever et al., 2023
BEV	66	EC, 2020
FCEV	84	EC, 2020

Los combustibles fósiles como el diésel y el LNG, son los que presentan un mayor contribución de la fase WTW de un 89 y 88% respectivamente, ya que la mayoría de las emisiones durante todo el ciclo de vida se dan durante la fase de conducción, es de decir TTW. La contribución de la fase WTW para el CNG es un poco inferior debido a la menor intensidad energética de su producción y distribución ya que producción de gas natural comprimido implica menos pasos y, por lo tanto, menos consumo de energía en comparación con el LNG.

Como se mencionó anteriormente, para las fuentes energéticas renovables como el biodiésel y los combustibles sintéticos, las emisiones neutras se consideran en la fase WTT o en la fase TTW según el artículo. Por ello, en estos casos, se ha dividido la contribución únicamente en CVV y WTW. Para el HVO, la contribución de la fase WTW representa el 73%. En el caso del UCOME, la contribución es ligeramente superior, alcanzando el 77%, reflejando diferencias en los procesos de recolección y transformación del aceite usado.

El diésel renovable, por su parte, presenta una contribución en la fase WTW del 84%, ya que como las emisiones se reducen mucho debido a que las emisiones durante la fase de conducción se consideran neutras, la fase WTT cobra mayor importancia. Los combustibles sintéticos, como el diésel sintético, tienen una contribución en la fase WTW del 74%, similar al HVO. Finalmente, el biometano, producido a partir de la digestión anaeróbica de residuos orgánicos, muestra una contribución en la fase WTW del 78%.

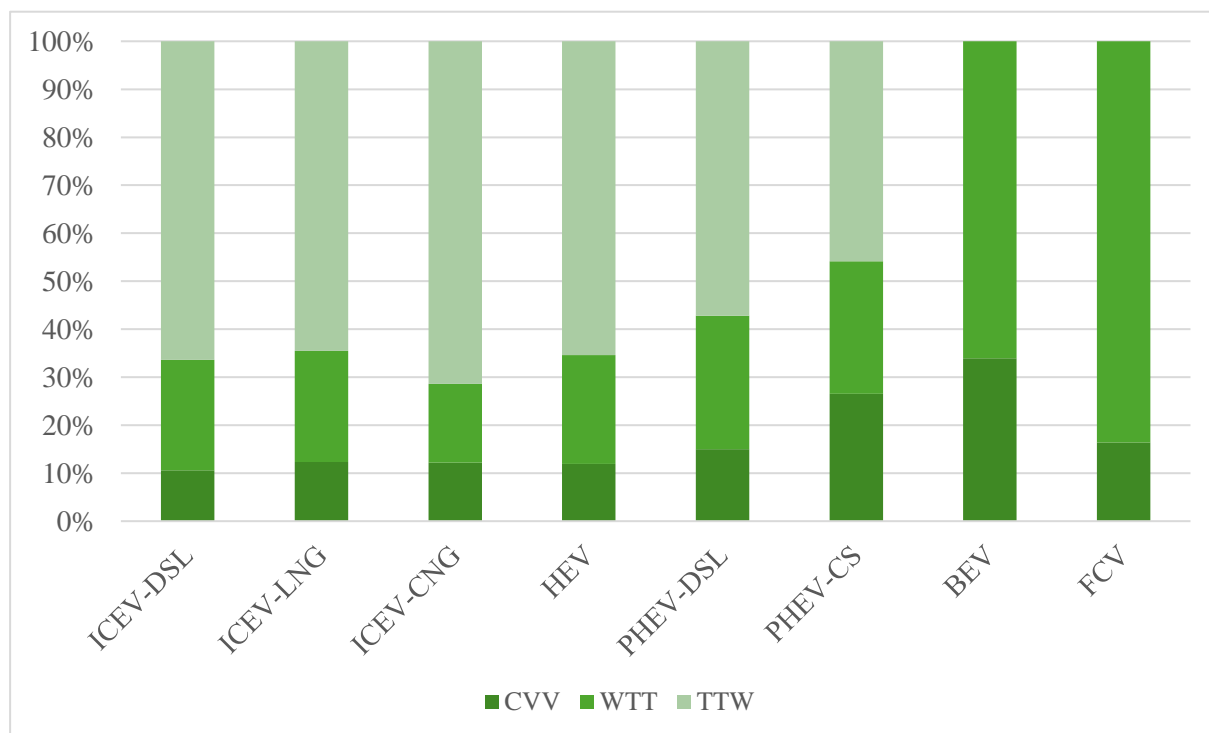
El PHEV y el HEV presentan contribuciones de emisiones en la fase WTW similares a los del diésel, con valores específicos de 85 y 88%, respectivamente. Para el PHEV, la principal fuente de variabilidad en esta contribución es la mezcla energética utilizada para cargar la batería. En el caso del HEV, la variabilidad depende principalmente de si se utiliza en rutas urbanas o interurbanas, ya que esto influye en el nivel de uso de la batería. En particular, los PHEV que emplean combustibles sintéticos muestran una reducción significativa en su contribución de emisiones WTW, disminuyendo a un 46%. Esto se debe a que las emisiones generadas cuando el vehículo usa el motor de combustión son consideradas neutras en las fases WTT, debido a la naturaleza de los combustibles sintéticos.

El BEV presenta un menor contribución de emisiones en la fase WTW en comparación con el FCEV. Esto se debe a que, durante la producción del vehículo BEV, el tamaño de las baterías necesarias para su funcionamiento incrementa significativamente las emisiones en la fase CVV. Por otro lado, los vehículos FCEV no requieren baterías tan grandes, lo que hace que la fase más importante en términos de emisiones sea la obtención del hidrógeno.

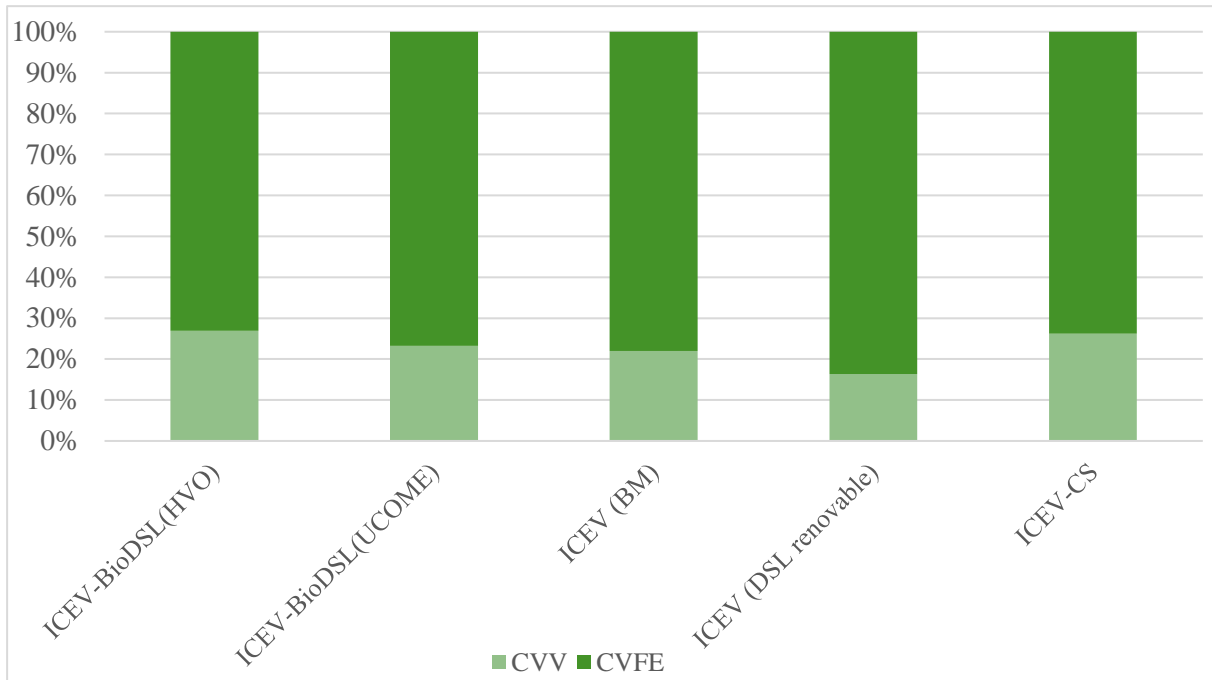
En ambos casos, la contribución de la fase WTW, donde las emisiones se concentran en la fase WTT varía considerablemente según el proceso de obtención de la fuente energética. Esta variabilidad está influenciada por factores como la eficiencia de la producción y el tipo de energía utilizada para generar electricidad o hidrógeno, destacando la importancia de optimizar estos procesos para reducir las emisiones totales.

#### 4.6.5. Contribución de todas las fases respecto a las emisiones totales

Para obtener una visión global de que fases dentro del ciclo de vida influyen más en el impacto total de cada una de las tecnologías de propulsión estudiadas, se ha representado en la **Figura 35** la contribución de las fases CVV, WTT y TTW para las diversas tecnologías de propulsión. En el caso de los biocombustibles y combustibles sintéticos, debido a que según el artículo consideran las emisiones neutras en la fase WTT o TTW únicamente se ha dividido la contribución en CVV y CVFE lo cual se puede observar en la **Figura 36**.



**Figura 35.** Contribución de las fases CVV, WTT y TTW respecto al impacto total para las tecnologías de propulsión estudiadas que emplean combustibles fósiles y las tecnologías BEV y FCEV. Fuente: Elaboración propia a partir de la **Tabla 12**, la **Tabla 13** y la **Tabla 14**



**Figura 36.** Contribución de las fases CVV, WTT y TTW respecto al impacto total para las tecnologías de propulsión estudiadas que emplean biocombustibles. Fuente: Elaboración propia a partir de la **Tabla 12** y la **Tabla 14**

Para los vehículos ICEV-DSL, la fase TTW es la que más contribuye a las emisiones totales, seguida por la fase WTT y, finalmente, por el CVV. Esto indica que la mayor parte de las emisiones proviene del uso del combustible durante la operación del vehículo. La combinación de las fases WTT y TTW representa aproximadamente un 90% de la contribución total.

Los ICEV que funcionan con LNG y CNG muestran un comportamiento similar al de los vehículos a diésel, con la fase TTW siendo predominante.

Los HEV también presentan una distribución similar, donde la fase TTW sigue siendo la más significativa. Sin embargo, la fase WTT podría cobrar más importancia si se aumenta el uso de la modalidad eléctrica.

Para los PHEV, aunque la fase TTW sigue siendo significativa, hay una reducción notable en comparación con los ICEV-DSL debido a que la modalidad eléctrica permite reducir las emisiones en esta fase. Los PHEV-CS muestran una alta contribución de las fases WTT y CVV, ya que las emisiones en la fase TTW son significativamente reducidas por las características neutras de los combustibles sintéticos durante la conducción.

En los BEV, la fase WTT es la más significativa, seguida por la fase CVV, debido a que la fase TTW no genera emisiones directas durante la operación del vehículo. Esto resalta la

importancia del mix energético utilizado en la fase WTT y la producción de baterías, que influyen significativamente en la fase CVV.

Para los FCEV, la fase WTT es predominante, reflejando las emisiones asociadas a la producción y suministro de hidrógeno. La fase CVV también tiene un mayor contribución en comparación con los BEV, ya que, en el caso de los FCEV, las baterías necesarias son de menor tamaño.

En cuanto a los biocombustibles, como se observa en la **Figura 36**, todos siguen la misma tendencia. La fase CVFE es la principal fuente de emisiones en todas las tecnologías de propulsión que emplean biocombustibles, representando entre el 70 y el 80% del impacto total. La fase CVV tiene una contribución menor en todas las tecnologías, oscilando entre el 20 y el 30% del impacto total. En comparación con el diésel, la fase CVV tiene una mayor importancia relativa. Las diferencias en el porcentaje de contribución de la fase CVFE se deben principalmente a las emisiones generadas durante la obtención de estos combustibles, ya que pueden resultar en emisiones neutras, negativas o elevadas.



## 5. CONCLUSIONES

Tras realizar la exhaustiva revisión bibliográfica para proporcionar una visión integral de las emisiones de GEI generadas por el sector del transporte de mercancías, considerando diferentes tecnologías de propulsión y estudiando diferentes fuentes energéticas, las conclusiones más relevantes son las siguientes:

- **Variabilidad de emisiones:** las emisiones de los camiones muestran una gran variabilidad dependiendo de varios factores como el tipo de camión, el ámbito geográfico/temporal, el tipo de ruta y la carga transportada. Por esta razón no se ha podido realizar un análisis comparativo en unidades de absolutas, sino que se ha realizado en unidades relativas comparando siempre frente al diésel.
- **Importancia del análisis del ciclo de vida completo:** evaluar las emisiones de GEI a lo largo del ciclo de vida completo de los vehículos (desde la extracción de materias primas hasta el final de la vida útil) proporciona una visión más completa del impacto ambiental. Esto ayuda a identificar las etapas del ciclo de vida con mayor potencial de reducción de emisiones y a diseñar intervenciones más efectivas.
- **Variación de emisiones según la ruta de obtención de la fuente energética:** las emisiones varían considerablemente dependiendo de la fuente energética y su método de obtención. Por ejemplo, la producción de hidrógeno por electrólisis con energía renovable es mucho menos intensiva en carbono que la producción a partir de gas natural. Igualmente, la generación de electricidad a partir de carbón es mucho más contaminante que a partir de fuentes renovables como solar o eólica.
- **La fase TTW,** predomina en las tecnologías de combustión interna (diésel, LNG, CNG), indicando que la mayor parte de las emisiones proviene del uso del combustible durante la operación del vehículo.
- **La fase WTT** tiene una importancia creciente en las tecnologías eléctricas e híbridas, especialmente en BEV y FCEV, donde el suministro de energía (eléctrica o hidrógeno) impacta significativamente en las emisiones totales.
- **La fase CVV,** aunque menos dominante, es relevante en todas las tecnologías, especialmente en tecnologías avanzadas como BEV y FCEV, debido a los procesos de producción de vehículos más complejos y materiales especializados. Las emisiones en esta fase son mayores en la tecnología BEV que en la FCEV debido al mayor tamaño de la batería.

- **Variabilidad en la contribución de las fases:** es complicado establecer el% de contribución de las fases del ciclo de vida para las tecnologías BEV y FCEV ya que, según el método de obtención de la fuente energética, la fase WTT cobrará una mayor o menor importancia.
- **Efecto de la batería en la fase de CVV para BEV:** la fase CVV tiene un impacto significativo en las emisiones de los BEV. La fabricación de la batería, en particular, es una fuente importante de emisiones de GEI. La masa de las baterías y el tipo de energía utilizado en su fabricación son factores críticos. Utilizar energías renovables y materiales más ligeros durante la producción de las baterías puede reducir considerablemente estas emisiones, mientras que el uso de energía intensiva en carbono incrementa el impacto ambiental.
- **Emisiones nulas e incluso negativas en la fase WTT de los biocombustibles:** los biocombustibles pueden resultar en emisiones nulas durante la fase WTT dependiendo del método de obtención. Esto se debe a que el CO<sub>2</sub> capturado durante el crecimiento de las plantas utilizadas para producir biocombustibles puede compensar las emisiones liberadas durante su combustión, resultando en un balance neto cero de carbono. Para obtener emisiones negativas, es necesario que el proceso de producción del biocombustible genere subproductos adicionales que puedan reemplazar la producción de otros materiales o energía, que de otro modo se obtendrían mediante métodos que generan emisiones de GEI.
- **Uso de HEV en rutas urbanas frente interurbanas:** en el caso de los vehículos HEV, el uso en rutas urbanas o interurbanas tiene diferentes implicaciones sobre las emisiones en el CVFE. Las rutas urbanas, con frecuentes paradas y arranques, permiten un mejor aprovechamiento del sistema de frenado regenerativo, reduciendo así las emisiones. En contraste, en rutas interurbanas con velocidades constantes, el motor de combustión interna es predominantemente utilizado, lo que puede aumentar las emisiones en comparación con las rutas urbanas.
- **Influencia del mix energético en BEV y PHEV:** las emisiones de GEI en la fase WTT de los BEV y los PHEV varían significativamente según la procedencia del mix energético utilizado para cargar las baterías. Un mix energético basado en combustibles fósiles, como el carbón, resulta en mayores emisiones, mientras que un mix basado en energías renovables reduce considerablemente el impacto ambiental. Por ejemplo, en escenarios donde se utiliza energía 100% renovable, las emisiones pueden ser prácticamente nulas. Esto destaca la necesidad de una transición hacia fuentes de energía menos emisoras en el sector eléctrico para maximizar los beneficios ambientales de los BEV.

- **Impacto del proceso de obtención del hidrógeno en las emisiones:** la variabilidad en las emisiones asociadas al ciclo de vida de los FCEV está fuertemente influenciada por el método de producción del H<sub>2</sub>. Cuando el hidrógeno se produce a través de procesos intensivos en carbono como el SMR o la gasificación del carbón, las emisiones son significativamente altas. En contraste, la producción de hidrógeno mediante electrólisis del agua utilizando energía renovable reduce notablemente las emisiones de GEI, inclusive pudiendo obtener emisiones negativas cuando se emplea la tecnología EF con CCS.
- **Impacto de la tecnología de CCS:** la implementación de tecnologías de CCS en procesos industriales y plantas de producción de hidrógeno puede reducir drásticamente las emisiones. Estas tecnologías pueden capturar una gran parte del CO<sub>2</sub> emitido durante la producción y prevenir su liberación a la atmósfera
- **Existencia de múltiples soluciones para la lucha contra el cambio climático:** comparar las emisiones de diferentes tecnologías de propulsión (ICEV, HEV, PHEV, BEV, FCEV) revela que no existe una solución única para todos los contextos. Cada tecnología tiene ventajas y desventajas específicas según el tipo de uso, disponibilidad de infraestructura y mix energético de la región. Esto indica la necesidad de una estrategia diversificada que combine varias tecnologías para lograr una movilidad sostenible.
- **Durabilidad y ciclo de vida de los BEV:** la vida útil y durabilidad de los BEV y PHEV juegan un papel crucial en su impacto ambiental total. Vehículos con ciclos de vida más largos pueden distribuir las emisiones de fabricación sobre más años de uso, reduciendo el impacto anualizado. Programas de reciclaje y reutilización de componentes también pueden reducir el impacto total.
- **Integración de energías renovables en la cadena de suministro:** integrar fuentes de energía renovable en toda la cadena de suministro, no solo en la carga de los BEV, sino también en la fabricación de vehículos y componentes, puede reducir las emisiones de GEI. El uso de energía solar, eólica o hidráulica en las fábricas y durante el transporte de componentes puede tener un impacto positivo significativo.
- **Importancia de las políticas y regulaciones gubernamentales:** las políticas y regulaciones gubernamentales que promuevan la adopción de tecnologías de bajo impacto y establezcan límites de emisiones pueden acelerar la transición hacia un transporte más sostenible. Incentivos fiscales, subsidios para los BEV y regulaciones estrictas de emisiones pueden impulsar cambios significativos en el sector.

- **Limitaciones del estudio:** la investigación presenta ciertas limitaciones que deben ser consideradas para futuras investigaciones y análisis. Una de las principales limitaciones es la necesidad de actualización constante de la información. Dado que la tecnología y las metodologías de ACV están en continua evolución, es crucial revisar y actualizar los datos de manera periódica para asegurar la relevancia y precisión de los resultados. Los avances en tecnologías de propulsión, cambios en la composición del mix energético y mejoras en los procesos de producción y distribución de combustibles deben ser incorporados en futuras evaluaciones.
- Además, es fundamental realizar revisiones periódicas del informe para comparar los nuevos resultados con los anteriores, lo que permitirá observar la evolución tecnológica y metodológica en el ACV. Estas revisiones ayudarán a identificar tendencias, mejoras en la eficiencia y la efectividad de las políticas implementadas, así como a ajustar las estrategias de mitigación de emisiones de GEI en el sector del transporte. La implementación de un marco de monitoreo continuo y análisis comparativo es esencial para asegurar que las decisiones tomadas estén basadas en datos actualizados y reflejen los últimos avances tecnológicos y metodológicos.

## 6. LÍNEAS FUTURAS

Este estudio del impacto ambiental del transporte de mercancías por carretera ha tradicionalmente centrado su atención en las emisiones de GEI y, por tanto, en el impacto sobre el cambio climático (huella de carbono). Sin embargo, existen otros impactos ambientales significativos que podrían ser explorados en futuras investigaciones para una evaluación más completa y precisa:

- **Consumo de recursos naturales:** investigar el uso intensivo de recursos naturales, como agua y materiales no renovables, en la construcción y mantenimiento de infraestructuras de transporte por carretera.
- **Contaminación acústica y fragmentación del hábitat:** evaluar los efectos de la contaminación acústica generada por el tráfico de mercancías en áreas naturales y comunidades locales. Además, estudiar cómo las carreteras pueden fragmentar hábitats naturales y afectar la migración de especies.
- **Impactos en la Calidad del Suelo:** investigar cómo la construcción y el mantenimiento de carreteras pueden provocar la erosión del suelo, la compactación y la contaminación por productos químicos utilizados en la pavimentación y mantenimiento.
- **Resiliencia ante desastres naturales:** analizar la capacidad de las infraestructuras de transporte por carretera para resistir y recuperarse de eventos climáticos extremos, como inundaciones y deslizamientos de tierra, considerando el cambio climático y su impacto en la frecuencia e intensidad de estos eventos.
- **Impactos socioeconómicos:** estudiar los impactos socioeconómicos del transporte de mercancías por carretera en comunidades locales, incluyendo efectos en la salud pública, el acceso a servicios básicos y las oportunidades de empleo. Así, se podrían analizar los otros dos pilares de la sostenibilidad, el económico y el social.
- **Huella ecológica global:** realizar análisis de ciclo de vida más completos que consideren la huella ecológica global del transporte por carretera, incluyendo la extracción de recursos, la fabricación y el fin de vida útil de los vehículos y la infraestructura asociada.

Estas áreas de investigación pueden proporcionar una visión más holística de los impactos ambientales del transporte de mercancías por carretera y guiar el desarrollo de políticas y prácticas más sostenibles en el sector del transporte. Explorar estos temas permitirá una gestión más eficaz de los recursos naturales, una mayor protección de los ecosistemas y una mejora en la calidad de vida de las comunidades afectada.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Agencia Europea de Medio Ambiente. (2023). *Emisiones de gases de efecto invernadero procedentes del transporte en la UE — Agencia Europea de Medio Ambiente*. <https://www.eea.europa.eu/es/senales/senales-2022/infografias/emisiones-de-gases-de-efecto/view>
- Alonso Raposo, M., Ciuffo, B., Alves Dies, P., Ardente, F., Aurambout, J.-P., Baldini, G., Baranzelli, C., Blagoeva, D., Bobba, S., Braun, R., Cassio, L., Chawdhry, P., Christidis, P., Christodoulou, A., Corrado, S., Duboz, A., Duch Brown, N., Felici, S., Fernández Macías, E., ... Vandecasteele, I. (2019). *The future of road transport - Implications of automated, connected, low-carbon and shared mobility*. <https://doi.org/10.2760/668964>
- Alonso-Villar, A., Davíðsdóttir, B., Stefánsson, H., Ásgeirsson, E. I., & Kristjánsson, R. (2022). Technical, economic, and environmental feasibility of alternative fuel heavy-duty vehicles in Iceland. *Journal of Cleaner Production*, 369, 133249. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.133249>
- Antonini, C., Treyer, K., Moiola, E., Bauer, C., Schildhauer, T. J., & Mazzotti, M. (2021). *Hydrogen from wood gasification with CCS—a techno-environmental analysis of production and use as transport fuel* †. <https://doi.org/10.1039/d0se01637c>
- Argonne National Laboratory's Systems Assessment Center (ANL). (2020). *The Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Technologies Model (GREET)*. <https://greet.anl.gov/>
- Booto, G. K., Aamodt Espegren, K., & Hancke, R. (2021). Comparative life cycle assessment of heavy-duty drivetrains: A Norwegian study case. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 95, 102836. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2021.102836>
- Castanheira, É. G., Grisoli, R., Coelho, S., Anderi Da Silva, G., & Freire, F. (2015). Life-cycle assessment of soybean-based biodiesel in Europe: Comparing grain, oil and biodiesel import from Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 102, 188-201. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2015.04.036>
- Chang, C. C., & Huang, P. C. (2022). Carbon footprint of different fuels used in public transportation in Taiwan: a life cycle assessment. *Environment, Development and Sustainability*, 24(4), 5811-5825. <https://doi.org/10.1007/S10668-021-01685-6/TABLES/6>
- Chang, C. C., Liao, Y. T., & Chang, Y. W. (2019). Life cycle assessment of alternative energy types – including hydrogen – for public city buses in Taiwan. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(33), 18472-18482. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2019.05.073>
- Comisión Europea. (2023). *Press corner | European Commission*. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/qanda\\_23\\_763](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/qanda_23_763)
- Commission, E., Action, D.-G. for C., Hill, N., Amaral, S., Morgan-Price, S., Nokes, T., Bates, J., Helms, H., Fehrenbach, H., Biemann, K., Abdalla, N., Jöhrens, J.,

- Cotton, E., German, L., Harris, A., Haye, S., Sim, C., Bauen, A., & Ziem-Milojevic, S. (2020). *Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through LCA – Final report*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/doi/10.2834/91418>
- Drawer, C., Rödl, A., & Kaltschmitt, M. (2024). Life cycle assessment of construction and driving operation of a hydrogen-powered truck built from a used diesel truck. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 24, 101020. <https://doi.org/10.1016/J.TRIP.2024.101020>
  - El Hannach, M., Ahmadi, P., Guzman, L., Pickup, S., & Kjeang, E. (2019). Life cycle assessment of hydrogen and diesel dual-fuel class 8 heavy duty trucks. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(16), 8575-8584. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2019.02.027>
  - Europea, C., Investigación, C. C. de, Prussi, M., Yugo, M., De Prada, L., Padella, M., & Edwards, R. (2020). *JEC well-to-tank report V5 : JEC well-to-wheels analysis : well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context*. Publications Office. <https://doi.org/doi/10.2760/100379>
  - Ferreira, M. B., Salvador, R., Barros, M. V., Souza, J. T. de, Rabelo, T. G. L., de Francisco, A. C., Coelho, R., & Piekarski, C. M. (2020). Eco-efficiency of the differential ratio change in a heavy-duty vehicle and implications for the automotive industry. *Sustainable Production and Consumption*, 21, 145-155. <https://doi.org/10.1016/J.SPC.2019.12.005>
  - Guerrero de la Peña, A., Davendralingam, N., Raz, A. K., DeLaurentis, D., Shaver, G., Sujan, V., & Jain, N. (2020). Projecting adoption of truck powertrain technologies and CO2 emissions in line-haul networks. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 84, 102354. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2020.102354>
  - Gunawan, T. A., & Monaghan, R. F. D. (2022). Techno-econo-environmental comparisons of zero- and low-emission heavy-duty trucks. *Applied Energy*, 308, 118327. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2021.118327>
  - Gupta, R., McRoberts, R., Yu, Z., Smith, C., Sloan, W., & You, S. (2022). Life cycle assessment of biodiesel production from rapeseed oil: Influence of process parameters and scale. *Bioresource Technology*, 360. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2022.127532>
  - Gustafsson, M., & Svensson, N. (2021). Cleaner heavy transports – Environmental and economic analysis of liquefied natural gas and biomethane. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123535. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.123535>
  - Gustafsson, M., Svensson, N., Eklund, M., Dahl Öberg, J., & Vehabovic, A. (2021). Well-to-wheel greenhouse gas emissions of heavy-duty transports: Influence of electricity carbon intensity. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 93, 102757. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2021.102757>
  - Hanesch, S., Schöpp, F., Göllner-Völker, L., & Schebek, L. (2022). Life Cycle Assessment of an emerging overhead line hybrid truck in short-haul pilot operation. *Journal of Cleaner Production*, 338, 130600. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.130600>

- IPCC. (2023). *CLIMATE CHANGE 2023 Synthesis Report A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Iyer, R. K., Kelly, J. C., & Elgowainy, A. (2023). Vehicle-cycle and life-cycle analysis of medium-duty and heavy-duty trucks in the United States. *Science of The Total Environment*, 891, 164093. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.164093>
- Keogh, N., Corr, D., & Monaghan, R. F. D. (2024). An environmental and economic assessment for biomethane injection and natural gas heavy goods vehicles. *Applied Energy*, 360, 122800. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2024.122800>
- Koroma, M. S., Costa, D., Philippot, M., Cardellini, G., Hosen, M. S., Coosemans, T., & Messagie, M. (2022). Life cycle assessment of battery electric vehicles: Implications of future electricity mix and different battery end-of-life management. *Science of The Total Environment*, 831, 154859. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.154859>
- Lajevardi, S. M., Aksen, J., & Crawford, C. (2018). Examining the role of natural gas and advanced vehicle technologies in mitigating CO2 emissions of heavy-duty trucks: Modeling prototypical British Columbia routes with road grades. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 62, 186-211. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2018.02.011>
- Lee, D. Y., Elgowainy, A., Kotz, A., Vijayagopal, R., & Marcinkoski, J. (2018). Life-cycle implications of hydrogen fuel cell electric vehicle technology for medium- and heavy-duty trucks. *Journal of Power Sources*, 393, 217-229. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2018.05.012>
- Lee, U., Han, J., Wang, M., Ward, J., Hicks, E., Goodwin, D., Boudreaux, R., Hanarp, P., Salsing, H., Desai, P., Varenne, E., Klintbom, P., Willems, W., Winkler, S. L., Maas, H., De Kleine, R., Hansen, J., Shim, T., & Furusjö, E. (2016). Well-to-Wheels Emissions of Greenhouse Gases and Air Pollutants of Dimethyl Ether from Natural Gas and Renewable Feedstocks in Comparison with Petroleum Gasoline and Diesel in the United States and Europe. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 9(3), 546-557. <https://doi.org/10.4271/2016-01-2209>
- Liu, X., Elgowainy, A., Vijayagopal, R., & Wang, M. (2021). Well-to-Wheels Analysis of Zero-Emission Plug-In Battery Electric Vehicle Technology for Medium-And Heavy-Duty Trucks. *Environmental Science and Technology*, 55(1), 538-546. [https://doi.org/10.1021/ACS.EST.0C02931/ASSET/IMAGES/LARGE/ES0C02931\\_0008.JPEG](https://doi.org/10.1021/ACS.EST.0C02931/ASSET/IMAGES/LARGE/ES0C02931_0008.JPEG)
- Lyng, K. A., & Brekke, A. (2019). Environmental Life Cycle Assessment of Biogas as a Fuel for Transport Compared with Alternative Fuels. *Energies 2019, Vol. 12, Page 532*, 12(3), 532. <https://doi.org/10.3390/EN12030532>
- Máster en Ingeniería Química, C. 2023-2024. (2023). *Apuntes del curso de Ecología Industrial*.
- Middela, M. S., Mahesh, S., Kancharla, S. R., Ramadurai, G., Perme, R., Sripada, S. K., & Devi, G. (2022). Complete LCA of battery electric and conventional fuel



- vehicles for freight trips. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 110, 103398. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2022.103398>
- Ministerio de Transportes, M. y A. U. (2023). *La descarbonización del transporte*.
  - Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2024). *GUÍA PARA EL CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO Y PARA LA ELABORACIÓN DE UN PLAN DE MEJORA DE UNA ORGANIZACIÓN*. <https://cpage.mpr.gob.es/>
  - MITECO. (2021). *Qué es el cambio climático*. <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/que-es-el-cambio-climatico.html>
  - Mojtaba Lajevardi, S., Axsen, J., & Crawford, C. (2019). Comparing alternative heavy-duty drivetrains based on GHG emissions, ownership and abatement costs: Simulations of freight routes in British Columbia. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 76, 19-55. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2019.08.031>
  - Nelsen, E. (2015). *Hybrid and Plug-In Electric Vehicles (Spanish Version) (Brochure)*, Clean Cities, Energy Efficiency & Renewable Energy (EERE).
  - Nordelöf, A., Romare, M., & Tivander, J. (2019). Life cycle assessment of city buses powered by electricity, hydrogenated vegetable oil or diesel. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 75, 211-222. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2019.08.019>
  - Noroozi, M., Moghaddam, H. R., Shah, A., Charkhgard, H., Sarkar, S., Das, T. K., & Pohland, T. (2023). An AI-Assisted Systematic Literature Review of the Impact of Vehicle Automation on Energy Consumption. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 8(6), 3572-3592. <https://doi.org/10.1109/TIV.2023.3268300>
  - *Objetivos y metas de desarrollo sostenible - Desarrollo Sostenible*. (s. f.). Recuperado 10 de julio de 2024, de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
  - O'connell, A., Pavlenko, N., Bieker, G., & Searle, S. (2023). *A COMPARISON OF THE LIFE-CYCLE GREENHOUSE GAS EMISSIONS OF EUROPEAN HEAVY-DUTY VEHICLES AND FUELS*. [www.theicct.orgcommunications@theicct.org](http://www.theicct.orgcommunications@theicct.org)
  - Parlamento Europeo. (2023). *Cambio climático: gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global | Temas | Parlamento Europeo*. <https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20230316STO77629/cambio-climatico-gases-de-efecto-invernadero-que-causan-el-calentamiento-global>
  - Pérez, J., Lumbreras, J., Rodríguez, E., & Vedrenne, M. (2017). A methodology for estimating the carbon footprint of waste collection vehicles under different scenarios: Application to Madrid. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 52, 156-171. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2017.03.007>
  - *Plataforma de Electromovilidad - Tecnología de celda de combustible de hidrógeno*. (s. f.). Recuperado 7 de mayo de 2024, de <https://energia.gob.cl/electromovilidad/hidrogeno-verde/tecnologias-en-un-fcev>
  - Prussi, M., Yugo, M., De Prada, L., Padella, M., & Edwards, R. (2020). *JEC Well-To-Wheels report v5*. <https://doi.org/10.2760/100379>

- ¿Qué son los biocombustibles avanzados? Tipos y principales ventajas | Repsol. (2024). <https://www.repsol.com/es/tecnologia-digitalizacion/technology-lab/reduccion-emisiones/biocombustibles/index.cshtml>
- Qué son los combustibles sintéticos y cómo se producen | Repsol. (2024). <https://www.repsol.com/es/tecnologia-digitalizacion/technology-lab/movilidad-sostenible/combustibles-sinteticos/index.cshtml>
- Rashorras, J. (2019). *Vehículos eléctricos*. <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=FMqwDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=funcionamiento+de+los+veh%C3%ADculos+el%C3%A9ctricos&ots=sJ1IFJzb4U&sig=6Ku53Slc5DZO7iK9iIfEuMDB2Jg#v=onepage&q=funcionamiento%20de%20los%20veh%C3%ADculos%20el%C3%A9ctricos&f=false>
- Rial, M., & Pérez, J. (2021). Environmental performance of four different heavy-duty propulsion technologies using Life Cycle Assessment. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 11, 100428. <https://doi.org/10.1016/J.TRIP.2021.100428>
- Rupp, M., Schulze, S., & Kuperjans, I. (2018). Comparative Life Cycle Analysis of Conventional and Hybrid Heavy-Duty Trucks. *World Electric Vehicle Journal 2018*, Vol. 9, Page 33, 9(2), 33. <https://doi.org/10.3390/WEVJ9020033>
- Sen, B., Kucukvar, M., Onat, N. C., & Tatari, O. (2020). Life cycle sustainability assessment of autonomous heavy-duty trucks. *Journal of Industrial Ecology*, 24(1), 149-164. <https://doi.org/10.1111/JIEC.12964>
- Simons, S., & Azimov, U. (2021). Comparative Life Cycle Assessment of Propulsion Systems for Heavy-Duty Transport Applications. *Energies 2021*, Vol. 14, Page 3079, 14(11), 3079. <https://doi.org/10.3390/EN14113079>
- Smit, R., Helmers, E., Schwingshackl, M., Opetnik, M., & Kennedy, D. (2024). Greenhouse Gas Emissions Performance of Electric, Hydrogen and Fossil-Fuelled Freight Trucks with Uncertainty Estimates Using a Probabilistic Life-Cycle Assessment (pLCA). *Sustainability 2024*, Vol. 16, Page 762, 16(2), 762. <https://doi.org/10.3390/SU16020762>
- Speirs, J., Balcombe, P., Blomerus, P., Stettler, M., Brandon, N., & Hawkes, A. (2019). *CAN NATURAL GAS REDUCE EMISSIONS FROM TRANSPORT?* [www.sustainablegasinstitute.org/can-natural-gas-reduce-emissions-from-transport/](http://www.sustainablegasinstitute.org/can-natural-gas-reduce-emissions-from-transport/)
- Stettler, M. E. J., Woo, M., Ainalis, D., Achurra-Gonzalez, P., Speirs, J., Cooper, J., Lim, D. H., Brandon, N., & Hawkes, A. (2023). Review of Well-to-Wheel lifecycle emissions of liquefied natural gas heavy goods vehicles. *Applied Energy*, 333, 120511. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2022.120511>
- Sun, S., & Ertz, M. (2022). Life cycle assessment and risk assessment of liquefied natural gas vehicles promotion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 153, 111769. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.111769>
- Syed, A., Van Mierlo, J., & Messagie, M. (2019). Life cycle assessment of electrification of heavy-duty vehicle. *32nd International Electric Vehicle Symposium*. [https://www.researchgate.net/publication/337869931\\_Life\\_cycle\\_assessment\\_of\\_electrification\\_of\\_heavy-duty\\_vehicle](https://www.researchgate.net/publication/337869931_Life_cycle_assessment_of_electrification_of_heavy-duty_vehicle)

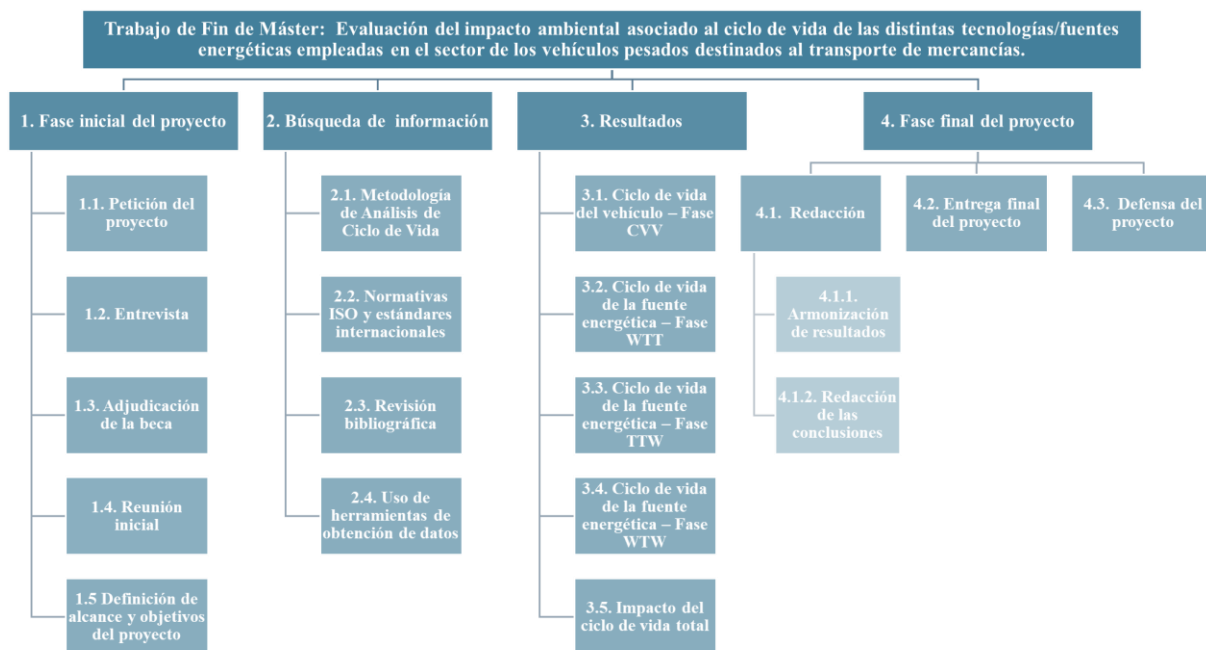
- Syré, A. M., Shyposha, P., Freisem, L., Pollak, A., & Göhlich, D. (2024a). *Comparative Life Cycle Assessment of Battery and Fuel Cell Electric Cars, Trucks and Buses*. <https://doi.org/10.20944/PREPRINTS202402.0906.V1>
- Syré, A. M., Shyposha, P., Freisem, L., Pollak, A., & Göhlich, D. (2024b). Comparative Life Cycle Assessment of Battery and Fuel Cell Electric Cars, Trucks, and Buses. *World Electric Vehicle Journal*, 15(3), 114. <https://doi.org/10.3390/WEVJ15030114/S1>
- Tratzi, P., Torre, M., Paolini, V., Tomassetti, L., Montiroli, C., Manzo, E., & Petracchini, F. (2022). Liquefied biomethane for heavy-duty transport in Italy: A well-to-wheels approach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 107, 103288. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2022.103288>
- van den Oever, A. E. M., Costa, D., & Messagie, M. (2023). Prospective life cycle assessment of alternatively fueled heavy-duty trucks. *Applied Energy*, 336, 120834. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2023.120834>
- Vásquez Tarazona, C. (2014). GESTIÓN DEL CARBONO: ¿UNA ALTERNATIVA EFECTIVA CONTRA EL CALENTAMIENTO GLOBAL? *Quipukamayoc*, 18(35), 143. <https://doi.org/10.15381/QUIPU.V18I35.3715>
- Wang, K., Gordillo Zavaleta, V., Li, Y., Sarathy, S. M., & Abdul-Manan, A. F. N. (2022). Life-cycle CO<sub>2</sub> mitigation of China's class-8 heavy-duty trucks requires hybrid strategies. *One Earth*, 5(6), 709-723. <https://doi.org/10.1016/J.ONEEAR.2022.05.013>
- Wolff, S., Seidenfus, M., Gordon, K., Álvarez, S., Kalt, S., & Lienkamp, M. (2020). Scalable Life-Cycle Inventory for Heavy-Duty Vehicle Production. *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 5396, 12(13), 5396. <https://doi.org/10.3390/SU12135396>
- Yeow, L. W., Yan, Y., & Cheah, L. (2022). Life cycle greenhouse gas emissions of alternative fuels and powertrains for medium-duty trucks: A Singapore case study. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 105, 103258. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2022.103258>
- Zah, R., Gmünder, S., Gauch, M., Arrango, C., Mira, D., & Toro, C. (2012). *Evaluación del ciclo de vida de la cadena de producción de biocombustibles en Colombia; Cap.II Estudio ACV - Impacto Ambiental*. [https://www.researchgate.net/publication/233739534\\_Evaluacion\\_del\\_ciclo\\_de\\_vida\\_de\\_la\\_cadena\\_de\\_produccion\\_de\\_biocombustibles\\_en\\_Colombia\\_CapII\\_Estudio\\_ACV\\_-\\_Impacto\\_Ambiental](https://www.researchgate.net/publication/233739534_Evaluacion_del_ciclo_de_vida_de_la_cadena_de_produccion_de_biocombustibles_en_Colombia_CapII_Estudio_ACV_-_Impacto_Ambiental)
- Zah, R., Gmünder, S., Gauch, M., Arrango, C., Mira, D., & Toro, C. (2023). *Perspectivas del Transporte del ITF 2023*. <https://doi.org/10.1787/b6cc9ad5-en>

## 8. PLANIFICACIÓN TEMPORAL Y PRESUPUESTO

Para llevar a cabo este proyecto, se ha requerido una cuidadosa inversión de recursos y una planificación meticulosa de las actividades, asegurando así su finalización dentro de los plazos establecidos. En los siguientes apartados se detalla la planificación estratégica del proyecto y la gestión del presupuesto asignado, fundamentales para garantizar el cumplimiento eficiente de los objetivos propuestos y el éxito del estudio sobre el análisis de ciclo de vida en vehículos pesados.

### 8.1. Estructura de descomposición del proyecto (EDP)

La EDP es una herramienta fundamental en la gestión de proyectos que desglosa las tareas y actividades necesarias para alcanzar los objetivos definidos. En este apartado, se presenta una desglose detallado y sistemático de las diversas componentes y subcomponentes que componen este proyecto. Cada elemento se organiza jerárquicamente, proporcionando una visión clara de cómo se estructuran y relacionan las actividades clave que conforman esta investigación. La planificación de este proyecto se ha agrupado en 4 fases principales que quedan recogidas en la **Figura 37**.



**Figura 37.** Estructura de descomposición del proyecto. Fuente: Elaboración propia

## 8.2. Diagrama de Gantt

El Diagrama de Gantt es una herramienta esencial para la planificación y gestión temporal de proyectos, permitiendo visualizar de manera clara y detallada las diferentes fases y actividades que componen el proyecto de análisis de ciclo de vida en vehículos. En esta sección se presenta en la una representación gráfica que muestra la secuencia cronológica de los paquetes de trabajo de la Estructura de Descomposición del Proyecto (EDP) que se muestra en la **Figura 37**. El diagrama destaca las fechas de inicio y finalización de cada tarea, así como la duración estimada y los hitos más relevantes del proyecto. Asimismo, se evidencia la simultaneidad de ciertas actividades mediante la superposición de barras correspondientes en el diagrama, reflejando la coordinación eficiente de recursos y la optimización del tiempo en la ejecución del proyecto

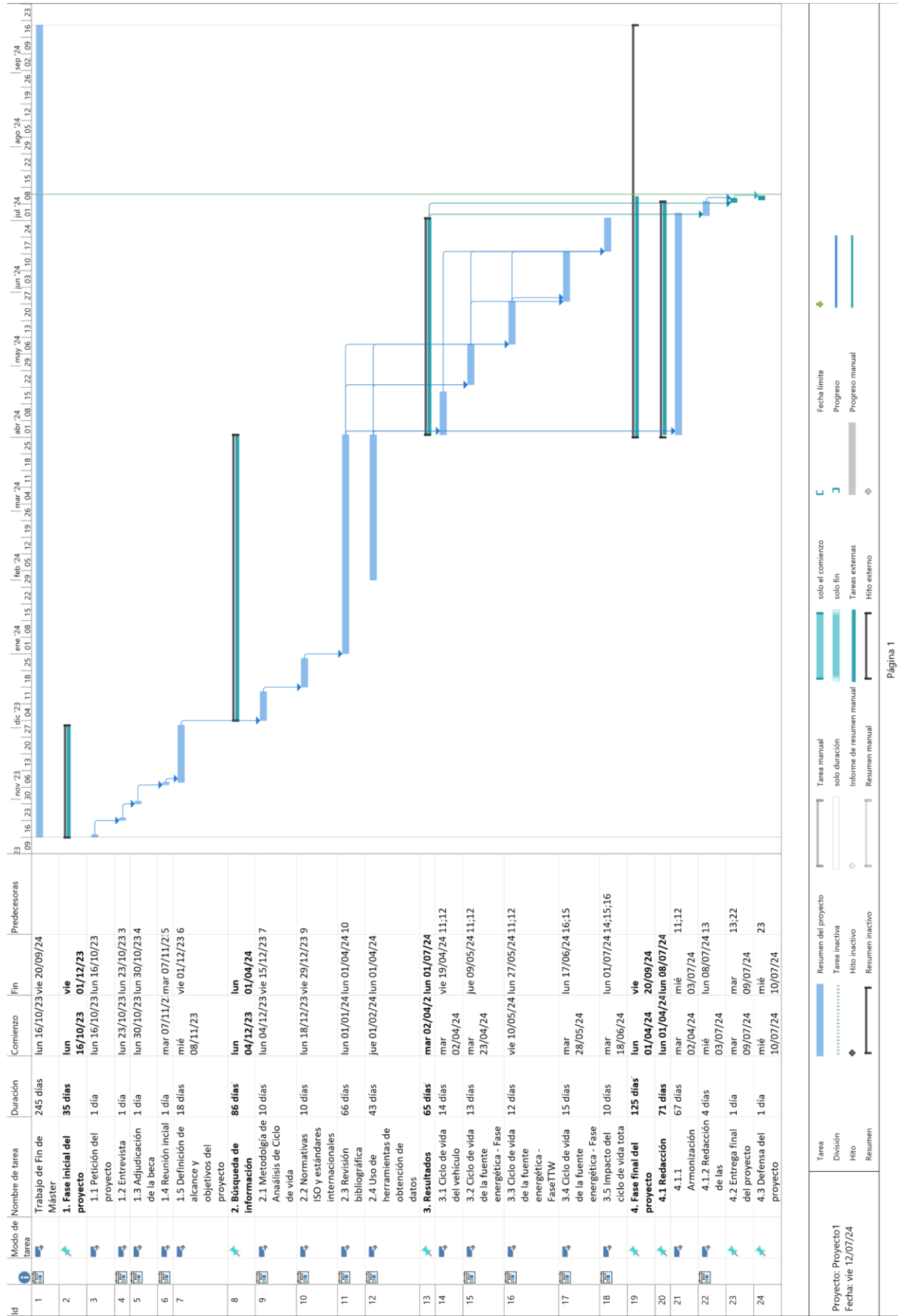


Figura 38. Diagrama de Gantt

### 8.3. Presupuesto

El presupuesto es una herramienta fundamental en la gestión de proyectos que permite la asignación eficiente de recursos financieros para la ejecución de actividades planificadas. En este apartado se detalla la distribución y gestión de los recursos económicos destinados al desarrollo de este proyecto.

Dentro de los costes personales del proyecto, se incluyen las horas de trabajo invertidas por el alumno, el tutor y el personal de la Fundación Repsol que ha colaborado en la organización de los eventos relacionados con la beca. El tiempo total empleado por el tutor abarca las horas dedicadas a las tutorías con el alumno, así como al seguimiento y revisión continua del proyecto y a la organización de eventos de carácter divulgativo. En cuanto al tiempo de trabajo del alumno, este ha sido cubierto mediante una beca otorgada por la Fundación Repsol, la cual ha financiado su dedicación y esfuerzo a lo largo de la duración del proyecto.

**Tabla 16.** Costes del personal del proyecto. Fuente: Elaboración propia

PERSONAL	PRECIO HORA	HORAS TOTALES	COSTE
Alumno	20 €/h	400 h	8.000 €
Tutor	60 €/h	75 h	4.500 €
Subtotal			12.500 €

Para la realización del TFM, es imprescindible contar con un equipo informático adecuado que permita la ejecución de software de análisis y redacción de documentos. A continuación, se desglosa el coste estimado del ordenador:

#### Ordenador portátil:

- Procesador: Intel Core i7
- Memoria RAM: 16 GB
- Almacenamiento: SSD 512 GB
- Sistema Operativo: Windows 10
- Precio estimado: 1,200 €

Este equipo ofrece el rendimiento necesario para manejar aplicaciones de software exigentes y proporcionar un entorno de trabajo eficiente.

El uso de software de oficina es fundamental para la redacción, presentación y gestión de los datos del TFM. Se ha optado por la suite de Microsoft Office debido a su amplia aceptación y funcionalidad.

**Licencia de Microsoft Office 365:**

- Incluye: Word, Excel, PowerPoint, Outlook, y otros programas útiles.
- Precio anual estimado: 99 €

El coste imputado se refiere al valor de los recursos propios utilizados en el proyecto, que no implica un desembolso adicional pero sí un uso de recursos con un valor económico.

**Coste Imputado del Ordenador:**

- Vida útil del ordenador: 7 años
- Uso estimado para el TFM: 50% del año (1/14 de la vida útil)
- Coste imputado:  $1.200 \text{ €} * (1/14) = 85,71 \text{ €}$

**Licencia de Microsoft Office 365:**

- Precio anual: 99 €
- Uso estimado para el TFM: 50% del año
- Coste imputado:  $99 \text{ €} * 0,50 = 49,50 \text{ €}$

**Tabla 17.** Costes materiales del proyecto. Fuente: Elaboración propia

CONCEPTO	COSTE	COSTE IMPUTABLE
Ordenador portátil	1.200,00 €	85,71 €
Licencia Office	99,00 €	49,50 €
Licencia COPERT	Gratuita	Ninguno
Licencia GREET	Gratuita	Ninguno
SUBTOTAL		135,21 €

Finalmente, se debe tener en cuenta el beneficio industrial y gastos generales del 19% y los costes indirectos del proyecto como puede ser la electricidad y el transporte. Se asume que los costes indirectos representan un 5% de los costes directos. Por lo que el coste final del proyecto es de 15.667,66 €, impuestos excluidos.

**Tabla 18.** Costes totales de proyecto. Fuente: Elaboración propia

CONCEPTO	IMPORTE
Costes de personal	12.500 €
Costes de material	135,21 €



Costes indirectos (5%)	631,76 €
Beneficio industrial y gastos generales (19%)	2400,69 €
TOTAL	15.667,66 €

## **9. EVALUACIÓN DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES, SOCIALES Y ECONÓMICOS DEL PROYECTO**

Desde un punto de vista ambiental, las emisiones de GEI producidas por el transporte de mercancías por carretera tienen múltiples efectos negativos. Estas emisiones contribuyen significativamente al cambio climático, acelerando el calentamiento global y provocando fenómenos meteorológicos extremos. Además, se generan otras emisiones que afectan a la calidad del aire urbano, aumentando los niveles de contaminación atmosférica que provocan problemas respiratorios y cardiovasculares en la población.

Los efectos del cambio climático se manifiestan de diversas maneras, incluyendo fenómenos meteorológicos extremos como olas de calor más frecuentes e intensas, sequías prolongadas, inundaciones repentinas y huracanes más intensos. Estos eventos extremos no solo amenazan la infraestructura y la seguridad de las comunidades humanas, sino que también afectan la biodiversidad y los ecosistemas naturales, poniendo en riesgo la seguridad alimentaria y el acceso a recursos hídricos.

Además, el cambio climático tiene repercusiones socioeconómicas significativas, exacerbando las desigualdades existentes y afectando de manera desproporcionada a las poblaciones más vulnerables y marginadas. Por ejemplo, las comunidades costeras y las áreas urbanas densamente pobladas enfrentan mayores riesgos de inundaciones y erosión costera debido al aumento del nivel del mar y eventos climáticos extremos.

Para abordar estos desafíos complejos, es fundamental implementar estrategias integrales que no solo reduzcan las emisiones de GEI del transporte por carretera, sino que también fortalezcan la resiliencia de las comunidades frente al cambio climático. Esto implica la adopción de tecnologías de vehículos menos emisoras, más sostenibles y eficientes, el desarrollo de infraestructuras resilientes al clima, la promoción del transporte público y formas de movilidad sostenibles, así como políticas climáticas ambiciosas a nivel global y local.

Uno de los desafíos sociales más relevantes es la accesibilidad económica a las tecnologías de menor huella de carbono. Los vehículos BEV, FCEV y PHEV, aunque más eficientes en términos ambientales, suelen ser significativamente más caros que los ICEV. Este alto coste inicial dificulta el acceso de una gran parte de la población a estas tecnologías, creando una barrera para la adopción masiva y la descarbonización del sector del transporte.

Además, solicitar a los propietarios de camiones que cambien sus vehículos nuevos con pocos kilómetros por otros con tecnologías de menor impacto ambiental puede ser problemático. Este cambio forzado no solo genera una carga económica considerable para los transportistas, sino que también puede incrementar los costes de los productos transportados, afectando así a los consumidores finales. Este choque entre la necesidad de reducir emisiones y las implicaciones económicas y sociales resalta la importancia de implementar políticas de apoyo y subsidios que faciliten la transición a tecnologías menos emisoras sin perjudicar a los sectores más vulnerables.

El alto coste de adquisición de vehículos BEV, PHEV y FCEV no solo afecta a los consumidores individuales, sino que también tiene implicaciones económicas más amplias. Las empresas de transporte enfrentan grandes inversiones iniciales para renovar sus flotas, lo que puede repercutir en un aumento de los costes operativos y, en última instancia, en el precio de los bienes y servicios. Este aumento de costes puede tener un impacto negativo en la competitividad del sector y en la economía en general.

Además, la necesidad de infraestructuras adecuadas para la carga de BEV y el suministro de hidrógeno añade otra capa de costes e inversiones que deben ser considerados. La implementación de estas infraestructuras es crucial para el éxito de la transición hacia un transporte más sostenible, pero requiere de un compromiso significativo por parte de los gobiernos y del sector privado.

En resumen, aunque la adopción de tecnologías de vehículos más sostenibles presenta claros beneficios ambientales, también plantea importantes desafíos sociales y económicos. La transición hacia un transporte sostenible debe ser gestionada cuidadosamente para equilibrar los costes y beneficios, asegurando que las políticas implementadas sean inclusivas y equitativas. El apoyo gubernamental y las políticas de subsidios serán esenciales para superar las barreras económicas y facilitar una adopción más amplia de estas tecnologías, contribuyendo así al logro de los objetivos de desarrollo y sostenibilidad (ODS) y a la creación de un futuro más sostenible para todos.

## 10. ANÁLISIS DE LOS ASPECTOS LEGALES Y ÉTICOS PERTINENTES A SU ELABORACIÓN Y/O APLICACIÓN

La implementación de tecnologías y procesos evaluados en este TFM está sujeta a una variedad de regulaciones y normativas. En primer lugar, es esencial cumplir con las leyes de emisiones y normas ambientales establecidas por entidades como la Unión Europea, que incluyen el Reglamento (UE) 2019/631 que establece normas de emisión de CO<sub>2</sub> para vehículos. Además, las directrices del Protocolo de Kioto y el Acuerdo de París deben ser consideradas, ya que ambos tratados internacionales imponen obligaciones a los países para reducir las emisiones de GEI.

La adopción de nuevas tecnologías, como los BEV y los FCEV, también debe alinearse con las políticas de incentivos fiscales y subvenciones ofrecidas por los gobiernos para fomentar la transición a tecnologías menos contaminantes. Estos incentivos pueden incluir exenciones fiscales, subsidios para la compra de vehículos ecológicos, y financiación para infraestructuras de carga y abastecimiento.

Desde el punto de vista de la seguridad y salud ocupacional, es necesario cumplir con distintas directivas de la UE, como la Directiva 2006/42/EC sobre maquinaria y la Directiva 2014/34/EU sobre equipos utilizados en atmósferas potencialmente explosivas (ATEX). Además, la correcta gestión y reciclaje de vehículos al final de su vida útil está regulada por la Directiva 2000/53/EC sobre vehículos al final de su vida útil, minimizando así el impacto ambiental, así como otra amplia gama de normativa en materia de gestión de residuos.

Desde un punto de vista ético, el proyecto debe abordar varias cuestiones clave:

**Justicia social:** la transición a tecnologías menos contaminantes puede implicar costes elevados, lo cual puede excluir a sectores de la población con menos recursos económicos. Es fundamental desarrollar políticas que aseguren un acceso equitativo a estas tecnologías, como subsidios y programas de apoyo financiero.

**Responsabilidad ambiental:** es crucial que las decisiones tecnológicas no solo cumplan con las normativas legales, sino que también adopten una postura proactiva en la protección del medio ambiente. Esto incluye la consideración del ciclo de vida completo de los productos, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final.

**Transparencia y comunicación:** las organizaciones deben ser transparentes respecto a las emisiones generadas y los beneficios ambientales de sus productos. Esto implica un compromiso con la divulgación precisa y comprensible de los datos de emisiones y los impactos ambientales a los consumidores y otras partes interesadas.

**Actualización continua:** dado el rápido avance tecnológico y la evolución de las metodologías de ACV, es fundamental actualizar regularmente los datos y las evaluaciones. Esto asegura que las decisiones se basen en la información más reciente y precisa, permitiendo comparaciones efectivas y adaptaciones a las nuevas tecnologías y normativas.

## 11. CONTRIBUCIÓN A LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

El proyecto está alineado estrechamente con varios ODS de las Naciones Unidas mostrados en la **Figura 39** apoyando de manera significativa a un desarrollo global sostenible y equitativo.



**Figura 39.** Objetivos de desarrollo sostenible. Fuente: Naciones Unidas (2022)

### **ODS 3: Salud y bienestar**

La reducción de las emisiones de contaminantes atmosféricos procedentes del transporte tiene un impacto positivo en la salud pública al mejorar la calidad del aire urbano y reducir la contaminación atmosférica. Estos factores están directamente relacionados con el ODS 3, ya que una mejor calidad del aire reduce la incidencia de enfermedades respiratorias y cardiovasculares en las poblaciones urbanas y rurales.

### **ODS 7: Energía asequible y no contaminante**

El proyecto promueve tecnologías menos emisoras y más sostenibles en el sector del transporte, lo cual contribuye al ODS 7, al fomentar el acceso a energías más sostenibles y menos contaminantes. La adopción de BEV y otras formas de movilidad sostenible reduce la dependencia de combustibles fósiles y mejora la eficiencia energética en las ciudades.

### **ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles**

Al reducir las emisiones de GEI y mejorar la eficiencia energética en áreas urbanas, el proyecto apoya el ODS 11 al promover el desarrollo de ciudades más sostenibles y resilientes. Esto

incluye la promoción de sistemas de transporte público eficientes y el diseño de infraestructuras urbanas que minimicen el impacto ambiental y mejoren la calidad de vida de los residentes.

### **ODS 13: Acción por el clima**

La mitigación del cambio climático es un objetivo central del proyecto al reducir las emisiones de GEI en el transporte de mercancías por carretera. Esto contribuye directamente al ODS 13 al ayudar a limitar el calentamiento global y sus impactos adversos en el medio ambiente y las comunidades vulnerables.

### **ODS 8: Trabajo decente y crecimiento económico**

Para garantizar una transición justa y equitativa hacia tecnologías de menor huella de carbono, el proyecto aborda las barreras económicas y sociales, promoviendo la creación de empleos decentes y el crecimiento económico inclusivo. Esto se alinea con el ODS 8 al facilitar oportunidades económicas en sectores emergentes como la movilidad sostenible.

### **ODS 10: Reducción de las desigualdades**

El proyecto también se alinea con el ODS 10 al reconocer la importancia de reducir las desigualdades sociales y económicas en la transición hacia una economía baja en carbono. Promover la inclusión social y económica asegura que todos los segmentos de la sociedad puedan beneficiarse por igual de las mejoras asociadas con la adopción de tecnologías menos contaminantes y sostenibles.

## 12. ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Ciclo de vida del vehículo y de la fuente energética. Fuente: Pérez et al. (2017)....	ii
<b>Figura 2.</b> Comparación relativa de las emisiones de GEI durante todo el ciclo de vida de todas las tecnologías de propulsión estudiadas frente al diésel. Fuente: Elaboración propia a partir de las referencias de la <b>Tabla 4</b> y la <b>Tabla 11</b> .....	iii
<b>Figura 3.</b> Contribución de las fases CVV, WTT y TTW respecto al impacto total para las tecnologías de propulsión estudiadas. Fuente: Elaboración propia a partir de la <b>Tabla 12</b> , la <b>Tabla 13</b> y la <b>Tabla 14</b> .....	v
<b>Figura 4.</b> Diagrama explicativo del efecto invernadero. Fuente: Vásquez Tarazona (2014) ...	3
<b>Figura 5.</b> Emisiones de GEI procedentes del transporte en la UE. Fuente: Agencia Europea de Medio Ambiente (2023) .....	5
<b>Figura 6.</b> Evolución de las emisiones de GEI del transporte por carretera en función del tipo de vehículo. Años .....	6
<b>Figura 7.</b> Emisiones del transporte de pasajeros y mercancías en los escenarios de Ambición Actual y de Alta Ambición, 2019-2050. Fuente: OCDE (2023) .....	8
<b>Figura 8.</b> Las cuatro fases principales de un ACV según la norma ISO 14040. Fuente: Zah et al. (2012) .....	15
<b>Figura 9.</b> Límites de un sistema estudiado mediante el ACV. Fuente: Apuntes del curso de Ecología Industrial (2023).....	16
<b>Figura 10.</b> Fases que incluye el ciclo de vida del vehículo y el ciclo de vida de la fuente energética. Fuente: Iyer et al. (2023).....	24
<b>Figura 11.</b> Impacto del ciclo de vida del vehículo para cada tecnología de propulsión considerada según la fuente energética empleada. Fuente: Elaboración propia a partir de las referencias de la <b>Tabla 4</b> .....	30
<b>Figura 12.</b> Comparación relativa de las emisiones de GEI durante la fase de ciclo de vida del vehículo de las tecnologías de propulsión ICEV, HEV y PHEV frente al diésel. Fuente: Elaboración propia a partir de las referencias de la <b>Tabla 4</b> .....	31
<b>Figura 13.</b> Comparación relativa de las emisiones de GEI durante la fase de ciclo de vida del vehículo de las tecnologías de propulsión BEV y FCEV frente al diésel. Fuente: Elaboración propia a partir de las referencias de la <b>Tabla 4</b> .....	32
<b>Figura 14.</b> Impacto en toneladas de CO <sub>2</sub> eq de cada uno de los elementos necesarios para la producción de un tractor pesado en ámbito europeo. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Wolff et al. (2020).....	35
<b>Figura 15.</b> Impacto en g CO <sub>2</sub> eq/milla de cada uno de los componentes necesarios para la fabricación de tres tipologías de vehículos pesados empleando diferentes tecnologías entre las que se encuentran los ICEV, HEV, BEV, PHEV. Fuente: Iyer et al. (2023).....	36
<b>Figura 16.</b> Impacto de la fase WTT para cada tecnología de propulsión considerada según la fuente energética empleada en las unidades g CO <sub>2</sub> eq/tkm. Fuente: Elaboración propia a partir de las referencias de la <b>Tabla 6</b> .....	41
<b>Figura 17.</b> Comparación relativa de las emisiones de GEI durante la fase WTT de las tecnologías de propulsión ICEV, HEV y PHEV frente al diésel. Fuente: Elaboración propia a partir de las referencias de la <b>Tabla 6</b> .....	42



<b>Figura 18.</b> Esquema de las diferentes escenarios en la fase WTW para el LNG. Cada una de las tres vías de obtención representa un posible escenario desde la producción hasta la combustión. Fuente: Elaboración propia a partir de Gustafsson & Svensson (2021).....	43
<b>Figura 19.</b> Emisiones de todo el ciclo de vida separadas en las fases WTT (electricidad), WTT(diésel), TTW y fabricación para un bus con tecnologías ICEV y PHEV según el mix energético del país en el año 2019. Fuente: Elaboración propia a partir de Syed et al. (2019)45	45
<b>Figura 20.</b> Comparación relativa de las emisiones de GEI durante la fase WTT de las tecnologías de propulsión BEV y FCEV frente al diésel. Fuente: Elaboración propia a partir de las referencias de la <b>Tabla 6</b> .....	46
<b>Figura 21.</b> Impacto del ciclo de vida de un camión Volvo Fe eléctrico separado en las fases de producción, uso y fin de vida útil según el mix energético empleado. Fuente: Elaboración propia .....	47
<b>Figura 22.</b> Emisiones de GEI totales de un camión en g CO <sub>2</sub> eq/tkm con tecnología HEV según el método de obtención del H <sub>2</sub> separado en las fases CVV, WTT y TTW. Fuente: Elaboración propia a partir de Antonini et al. (2021) .....	48
<b>Figura 23.</b> Emisiones de GEI en g CO <sub>2</sub> eq/MJ en la fase WTT de la vía seleccionada para las diversas fuentes energéticas estudiadas en el informe JEC y su variabilidad. Fuente: Elaboración propia a partir de Prussi et al. (2020).....	50
<b>Figura 24.</b> Impacto de la fase TTW para cada tecnología de propulsión considerada según la fuente energética empleada en unidades g CO <sub>2</sub> eq/tkm. Fuente: Elaboración propia a partir de las referencias de la <b>Tabla 6</b> y la <b>Tabla 8</b> .....	53
<b>Figura 25.</b> Comparación relativa de las emisiones de GEI durante la fase TTW de las tecnologías de propulsión estudiadas frente al diésel. Fuente: Elaboración propia a partir de las referencias de la <b>Tabla 6</b> y la <b>Tabla 8</b> .....	54
<b>Figura 26.</b> Funcionamiento dual de un PHEV indicando la zona de cero emisiones en modalidad eléctrica. Fuente: Syed et al. (2019).....	57
<b>Figura 27.</b> Emisiones de GEI en g CO <sub>2</sub> eq/tkm de un camión rígido en la fase TTW para las tecnologías estudiadas en el informe JEC para el año 2016. Fuente: Elaboración propia a partir de Prussi et al. (2020).....	58
<b>Figura 28.</b> Emisiones de GEI en g CO <sub>2</sub> eq/tkm de un camión rígido en la fase TTW para las tecnologías estudiadas en el informe JEC para el año 2025. Fuente: Elaboración propia a partir de Prussi et al. (2020).....	59
<b>Figura 29.</b> Análisis de las emisiones de la fase WTW de un camión rígido perteneciente al grupo 4 en g CO <sub>2</sub> eq/tkm para diversas tecnologías de propulsión y fuentes energéticas para el año 2016. Se representa tanto la variabilidad de las emisiones según el método de obtención de la fuente energético, como la ruta de obtención seleccionada, marcada con una cruz verde. Fuente: Elaboración propia a partir de Prussi et al. (2020) .....	61
<b>Figura 30.</b> Análisis de las emisiones de GEI de la fase WTW de un camión rígido perteneciente al grupo 4 en g CO <sub>2</sub> eq/tkm para diversas tecnologías de propulsión y fuentes energéticas para el año 2025. Se representa tanto la variabilidad de las emisiones según el método de obtención de la fuente energético, como la ruta de obtención seleccionada marcada con una cruz verde. Fuente: Elaboración propia a partir de Prussi et al. (2020).....	64

<b>Figura 31.</b> Análisis de las emisiones de GEI de la fase WTW para el año 2016 de un camión rígido perteneciente al grupo 4 en g CO <sub>2</sub> eq/tkm para diversas tecnologías de propulsión y fuentes energéticas. Se ha realizado la representación según el tipo de fuente energética empleada clasificadas en combustible fósil, combustible bajo en carbono, electricidad e hidrógeno. Fuente: Elaboración propia a partir de Prussi et al. (2020).....	65
<b>Figura 32.</b> Análisis de las emisiones de GEI de la fase WTW para el año 2025 de un camión rígido perteneciente al grupo 4 en g CO <sub>2</sub> eq/tkm para diversas tecnologías de propulsión y fuentes energéticas. Se ha realizado la representación según el tipo de fuente energética empleada clasificadas en combustible fósil, combustible bajo en carbono, electricidad e hidrógeno. Fuente: Elaboración propia a partir de Prussi et al. (2020).....	65
<b>Figura 33.</b> Impacto del ciclo de vida total para cada tecnología de propulsión considerada según la fuente energética empleada. Fuente: Elaboración propia a partir de las referencias de la <b>Tabla 4</b> y la <b>Tabla 11</b> .....	68
<b>Figura 34.</b> Comparación relativa de las emisiones de GEI durante todo el ciclo de vida de todas las tecnologías de propulsión estudiadas frente al diésel. Fuente: Elaboración propia a partir de las referencias de la <b>Tabla 4</b> y la <b>Tabla 11</b> .....	68
<b>Figura 35.</b> Contribución de las fases CVV, WTT y TTW respecto al impacto total para las tecnologías de propulsión estudiadas que emplean combustibles fósiles y las tecnologías BEV y FCEV. Fuente: Elaboración propia a partir de la <b>Tabla 12</b> , la <b>Tabla 13</b> y la <b>Tabla 14</b> .....	80
<b>Figura 36.</b> Contribución de las fases CVV, WTT y TTW respecto al impacto total para las tecnologías de propulsión estudiadas que emplean biocombustibles. Fuente: Elaboración propia a partir de la <b>Tabla 12</b> y la <b>Tabla 14</b> .....	81
<b>Figura 37.</b> Estructura de descomposición del proyecto. Fuente: Elaboración propia .....	94
<b>Figura 38.</b> Diagrama de Gantt.....	96
<b>Figura 39.</b> Objetivos de desarrollo sostenible. Fuente: Naciones Unidas (2022) .....	104

## 13. ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Potencial de calentamiento global y vida útil atmosférica. Fuente: IPCC (2023)....	11
<b>Tabla 2.</b> Categorías de impacto según la metodología EICV Environmental Footprint. Fuente: Elaboración propia .....	17
<b>Tabla 3.</b> Fuentes energéticas consideradas para cada una de las fuentes de propulsión consideradas. Fuente: Elaboración propia.....	25
<b>Tabla 4.</b> Recopilación de los artículos empleados para realizar la comparativa del impacto del ciclo de vida de las tecnologías de propulsión consideradas. Fuente: Elaboración propia .....	26
<b>Tabla 5.</b> Número de artículos revisados y empleados para el cálculo del impacto del CVV según la tecnología de propulsión. Fuente: Elaboración propia.....	29
<b>Tabla 6.</b> Recopilación de los artículos empleados para realizar la comparativa del impacto de la fase WTT de las tecnologías de propulsión consideradas. Fuente: elaboración propia .....	37
<b>Tabla 7.</b> Intensidad en carbono en kg/kWh de la red eléctrica según el país para el año 2019. Fuente: Elaboración propia a partir de Syed et al. (2019).....	45
<b>Tabla 8.</b> Estudio adicional empleado en el análisis de la fase TTW. Fuente: Elaboración propia .....	51
<b>Tabla 9.</b> Número de artículos revisados y empleados para el cálculo del impacto en las fases WTT y TTW según la tecnología de propulsión. Fuente: Elaboración propia .....	52
<b>Tabla 10.</b> Ruta seleccionada como representativa para cada una de las fuentes energéticas analizadas en el JEC. Fuente: Elaboración propia a partir de Prussi et al. (2020).....	61
<b>Tabla 11.</b> Estudios adicionales empleados en el análisis de la fase del WTW. Fuente: Elaboración propia .....	67
<b>Tabla 12.</b> Contribución del impacto del CVV respecto al impacto total para cada una de las tecnologías estudiadas y el artículo del cual se ha obtenido el valor. Fuente: Elaboración propia .....	72
<b>Tabla 13.</b> Contribución del impacto del WTT respecto al impacto total para varias de las tecnologías estudiadas y el artículo del cual se ha obtenido el valor. Fuente: Elaboración propia .....	74
<b>Tabla 14.</b> Contribución de la fase TTW respecto al impacto total para varias de las tecnologías estudiadas y el artículo del cual se ha obtenido el valor. Fuente: Elaboración propia .....	76
<b>Tabla 15.</b> Contribución de la fase WTW respecto al impacto total para varias de las tecnologías estudiadas y el artículo del cual se ha obtenido el valor. Fuente: Elaboración propia .....	78
<b>Tabla 16.</b> Costes del personal del proyecto. Fuente: Elaboración propia.....	97
<b>Tabla 17.</b> Costes materiales del proyecto. Fuente: Elaboración propia.....	98
<b>Tabla 18.</b> Costes totales de proyecto. Fuente: Elaboración propia.....	98

## 14. ABREVIATURAS, UNIDADES Y ACRÓNIMOS

**ACV:** Análisis de ciclo de vida

**AEMET:** Agencia Estatal de Meteorología

**ATR:** *Autothermal reforming* (Reformación autotérmica)

**BEV:** *Battery electric vehicle* (Vehículo eléctrico de batería)

**°C:** Grados centígrados

**CBM:** *Compressed biomethane* (Biometano comprimido)

**CCS:** *Carbon capture and storage* ( Captura y almacenamiento de carbono)

**CH<sub>4</sub>:** Metano

**CO<sub>2</sub>:** Dióxido de carbono

**CO<sub>2</sub> eq:** Dióxido de carbono equivalente

**CONCAWE:** *European oil companies' association for environment, health and safety in refining and distribution* (Asociación de empresas petroleras europeas para el medio ambiente, la salud y la seguridad en refinado y distribución)

**COP21:** 21ª Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

**CS:** Combustibles sintéticos

**CTG:** *Cradle-to-gate* (de la cuna a la puerta)

**CVFE:** Ciclo de vida de la fuente energética

**CVV:** Ciclo de vida del vehículo

**DME:** Dimetil éter

**DSL:** Diésel

**EEA:** *European Environment Agency* ( Agencia europea del medio ambiente)

**EDP:** Estructura de descomposición de proyecto

**EF:** *Entrained flow* (Flujo entrante)

**EICV:** Evaluación de impacto de ciclo de vida).

**ETSII-UPM:** Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid

**EUROCAR:** *European Council for Automotive Research and development* (Consejo Europeo de Investigación y Desarrollo del Automóvil)

**FCEV:** *Fuel cell electric vehicle* (Vehículo de celda de combustible de hidrógeno)

**FE:** Factor de emisión

**FT:** Fischer-Tropsch

**g:** Gramos

**GEI:** Gases de efecto invernadero

**GHG:** *Greenhouse gas protocol* (Protocolo de gases de efecto invernadero)

**GNC:** Gas natural comprimido

**GPW:** *Global warming potential* (Potencial de calentamiento global)

**REET:** *Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Technologies* (Gases de Efecto Invernadero, Emisiones Reguladas y Uso de Energía en Tecnologías)

**H<sub>2</sub>:** Hidrógeno

**HEV:** *Hybrid electric vehicle* (Vehículo híbrido eléctrico)

**HPDI:** *High pressure direct injection* (Inyección Directa de Alta Presión)

**HPR:** *Heat pipe reformer* (Reformador de tubos de calor)

**HVO:** *Hydrogenated vegetal oil* (Aceite vegetal hidrogenado)

**ICEV:** *Internal combustion engine vehicle* (Vehículo de motor de combustión interna)

**IPCC:** *Intergovernmental Panel on Climate Change* (Panel Intergubernamental para el Cambio Climático)

**ISO:** *International Organization for Standardization* (Organización Internacional de Normalización)

**JEC:** *Joint Research Centre-EUCAR-CONCAWE collaboration*

**km:** Kilómetros

**kW:** Kilovatios

**LCA:** *Life Cycle Assesment* (Evaluación del ciclo de vida)

**LiMnO<sub>2</sub>:** Dióxido de manganeso de litio

**LNG:** Gas natural licuado

**MITMA:** Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana

**MITECO:** Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico

**MJ:** Megajulios

**MTD:** Mejores técnicas disponibles

**Mt CO<sub>2</sub> eq:** Millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente

**N<sub>2</sub>O:** Óxido nitroso

**ODS:** Objetivos de desarrollo sostenible

**OME:** Oximetileno éter

**OxySer:** *Oxygen sorption enhanced reforming* (Reformado mejorado por sorción de oxígeno)

**PEM:** *Proton exchange membrane* (Membrana de intercambio de protones)

**PFCs:** Perfluorocarburos

**PHEV:** *Plug-in hybrid electric vehicle* (Vehículo híbrido eléctrico enchufable)

**PI:** De encendido por chispa

**RME:** : Biodiésel-Éster metílico de aceite de colza

**SF<sub>6</sub>:** Hexafluoruro de azufre

**SMR:** Steam methane reforming (Reformado de metano con vapor)

**TRL:** Technology Readiness Level (Nivel de madurez tecnológica)

**TTW:** *Tank-to-Wheel* (del tanque a la rueda)

**UCOME:** Biodiésel-éster metílico de aceite de cocina usado

**UE:** Unión Europea

**WTT:** *Well-to-Tank* (del pozo al tanque)

**WTW:** *Well-to-Wheel* (del pozo a la rueda)

## 15. GLOSARIO

**Análisis de ciclo de vida (ACV):** metodología que evalúa de manera integral las cargas ambientales asociadas con todas las etapas del ciclo de vida de un producto, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final.

**Cambio climático:** transformaciones a largo plazo en las temperaturas y los patrones climáticos, principalmente inducidas por actividades humanas, como la quema de combustibles fósiles.

**Ciclo de vida del vehículo:** es una fase del análisis del ciclo de vida de los vehículos que abarca las emisiones producidas en la fabricación del vehículo y en su disposición final.

**CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub>eq):** es una medida estandarizada para expresar el potencial de calentamiento global de diferentes GEI en función de la cantidad de dióxido de carbono que tendría el mismo efecto sobre el calentamiento global durante un período específico.

**Combustible fósil:** recursos naturales como el carbón, petróleo y gas, utilizados para generar energía y que emiten GEI al ser quemados.

**Gases de efecto invernadero (GEI):** gases como CO<sub>2</sub> y el CH<sub>4</sub>, que atrapan el calor en la atmósfera y contribuyen al calentamiento global.

**Huella de carbono:** medida del impacto ambiental de una persona, organización o producto, en términos de la cantidad de GEI emitidos.

**Índice GWP:** es una medida del impacto climático de un gas en comparación con el CO<sub>2</sub>. Se expresa como una cantidad de CO<sub>2</sub> eq y se utiliza para evaluar el potencial de calentamiento global de diferentes GEI.

**Tank-to-Wheel (TTW):** es una fase del análisis del ciclo de vida de los vehículos que abarca desde el momento en que el combustible sale del tanque del vehículo hasta que las emisiones se generan en la rueda del vehículo durante su uso.

**Transporte pesado:** vehículos como camiones y autobuses que tienen un gran tamaño y capacidad de carga, y son esenciales para el transporte de mercancías a largas distancias, pero contribuyen significativamente a las emisiones de GEI.



**Tecnologías de propulsión:** conjunto de tecnologías utilizadas para impulsar vehículos, que pueden incluir motores de combustión interna, motores eléctricos, y sistemas de celda de combustible de H<sub>2</sub>, entre otros.

**Well-to-Tank (WTT):** esta fase del análisis del ciclo de vida se refiere a las emisiones y otros impactos ambientales asociados con la extracción, procesamiento, transporte y distribución del combustible antes de que llegue al tanque del vehículo.

**Well-to-Wheel (WTW):** es un enfoque de análisis del ciclo de vida que evalúa todas las emisiones de GEI y otros impactos ambientales desde la extracción de materias primas hasta el uso del vehículo en la carretera, incluyendo la producción, distribución y uso del combustible.

**Unidad funcional:** es el parámetro específico y cuantificable utilizado como referencia durante un ACV. Define las condiciones bajo las cuales se evalúan los impactos ambientales de un producto, sistema o servicio.

