



Universidad
Zaragoza



ESTUDIO SOBRE EL CONCEPTO EMISIONES NETAS CERO APLICADO A LOS COMBUSTIBLES RENOVABLES

Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón – I3A.
Universidad de Zaragoza

JA, LMR, AGM, CG
I3a@unizar.es

ÍNDICE

1. Introducción General	1
2. Marco Legislativo	2
3. Conceptos de Análisis de Ciclo de Vida.	4
4. Producción de Combustibles Renovables.....	6
4.1. Combustibles Renovables a partir de Biomasa.....	6
4.2. Combustibles Renovables a partir de Captura de CO ₂ del Aire.	10
5. Conclusiones	12
6. Referencias	13
7. Anexos	17

1. Introducción General.

El cambio climático se ha consolidado como uno de los principales desafíos globales, estrechamente relacionado con las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero, en especial el dióxido de carbono (CO_2), cuya producción se debe al uso extensivo de combustibles fósiles en sectores clave como el transporte, la industria y la generación de energía eléctrica [1]. Este contexto ha impulsado la necesidad de transformar el modelo energético actual mediante la adopción de tecnologías sostenibles que permitan reducir las emisiones netas y mejorar la eficiencia en el uso de los recursos. La transición hacia fuentes de energía de baja emisión constituye un eje fundamental para avanzar hacia sistemas energéticos más seguros, resilientes y sostenibles a largo plazo.

Los **combustibles renovables** representan una alternativa real para la descarbonización tanto del sector del transporte como de otros sectores difíciles de electrificar [2][3]. Estos combustibles, en función de su origen, se pueden dividir en biocombustibles y combustibles sintéticos. La importancia de estos combustibles radica en su potencial para imitar las propiedades de los combustibles fósiles convencionales, como la gasolina, el diésel, el metano o el queroseno, y pueden utilizar la infraestructura y los vehículos existentes sin modificaciones significativas, contribuyendo a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y a mejorar la seguridad del suministro de la UE. Esto los convierte en una alternativa viable técnica, económica y medioambientalmente a los combustibles líquidos fósiles para el mercado [2][3][4][5][6].

Los **biocombustibles** son combustibles líquidos o gaseosos elaborados a partir de materia orgánica renovable llamada biomasa. La biomasa suele clasificarse en cuatro grandes categorías: leñosa y de madera, herbácea, acuática y aquella derivada de desechos de origen animal o humano [7]. Entre los biocombustibles más representativos se encuentran el biodiesel, el bioetanol y el biogás, cada uno producido mediante procesos fisicoquímicos o biotecnológicos [8].

Los **combustibles sintéticos** de origen no biológico se sintetizan principalmente combinando hidrógeno (H_2) y dióxido de carbono (CO_2). El hidrógeno utilizado en la producción de RFNBOs deriva de agua y energía renovable (distinta de la biomasa), en forma de calor o electricidad. El CO_2 puede provenir de diversas fuentes, incluyendo fuentes fósiles (como gases de combustión), tecnologías de Captura Directa del Aire y otras fuentes no renovables y naturales [9].

El presente informe tiene como objetivo analizar de forma rigurosa las emisiones de CO_2 de los combustibles renovables exponiendo las metodologías de cálculo de emisiones para validar el concepto de cero emisiones netas en la utilización de este tipo de combustibles.

2. Marco Legislativo.

Tanto el marco legislativo de la UE como el español reconocen a los combustibles renovables (biocombustibles y RFNBOs) como una herramienta clave para la descarbonización del transporte, estableciendo definiciones claras, criterios estrictos de sostenibilidad, objetivos ambiciosos de incorporación y metodologías detalladas para evaluar su impacto ambiental a lo largo del ciclo de vida.

En la Unión Europea, el marco legislativo para fomentar el uso de energías renovables en el transporte y definir criterios de sostenibilidad para los combustibles alternativos ha evolucionado significativamente. La Directiva 2018/2001, conocida como RED II, es fundamental en este ámbito [10]. Esta directiva revisó los criterios de sostenibilidad y de reducción de emisiones de CO_{2e} para biocarburantes, y amplió su ámbito a los combustibles de biomasa. Establece normas específicas para los biocarburantes, los biolíquidos y los combustibles de biomasa producidos a partir de biomasa forestal, exigiendo la sostenibilidad de las operaciones de aprovechamiento y la contabilización de las emisiones resultantes del cambio de uso de la tierra.

En el ámbito de los biocombustibles destinados al transporte, las instalaciones que entran en funcionamiento a partir de enero de 2021 deberán lograr una reducción mínima del 65 % en las emisiones de CO_{2e} [10]. Esta exigencia es menos estricta para las instalaciones que comenzaron a operar con anterioridad.

La RED II también introdujo la categoría de RFNBOs, definiéndolos como aquellos producidos a partir de hidrógeno derivado de energía renovable de origen no biológico y CO₂ o N₂. Se establece que la electricidad usada en la producción de estos combustibles debe de ser de origen renovable de origen no biológico para que estos combustibles contribuyan a la reducción de GEI. Para definir las reglas de producción de los RFNBOs, la Comisión adoptó dos Actos Delegados el 13 de febrero de 2023, como exige el Artículo 27(3) de la RED II. El primer Acto Delegado (Reglamento Delegado (UE) 2023/1184) define cuándo el hidrógeno, los combustibles basados en hidrógeno u otros portadores de energía pueden considerarse RFNBOs [11]. Las reglas buscan asegurar que estos combustibles solo puedan producirse a partir de electricidad renovable "adicional" generada al mismo tiempo y en la misma zona que su producción. El segundo Acto Delegado (Reglamento Delegado (UE) 2023/1185) especifica la metodología para calcular los ahorros de emisiones de GEI de los RFNBOs y los combustibles de carbono reciclado, tomando en cuenta el ciclo de vida completo [12].

La metodología para calcular la reducción de emisiones de GEI, incluyendo CO₂, metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) convertidos a equivalentes de CO₂, está detallada en la normativa, basándose en el ciclo de vida. Se establece un umbral mínimo de reducción de emisiones de CO_{2e} para los RFNBOs para el transporte, deben lograr una reducción de al menos el 70% a partir del 1 de enero de 2021, en comparación con el combustible fósil de referencia. El valor de referencia estándar para los combustibles fósiles empleados en el transporte se establece en 94 gCO_{2e}/MJ [12].

Debido a la utilización de energías renovables en el transporte, la revisión de la RED II (conocida como RED III [13]) también eleva el objetivo vinculante de la UE para la energía renovable para 2030 a un mínimo del 42.5%, con una aspiración del 45%. En el transporte, se da a los Estados miembros la opción de elegir entre un objetivo vinculante del 14,5% de reducción de la intensidad de GEI o un objetivo vinculante de al menos el 29% de cuota de energías renovables en el consumo final de energía para 2030. La RED III, cuyo plazo de transposición de la RED III finalizaba el 21 de mayo de 2025¹, establece un sub-objetivo combinado vinculante del 5.5% para biocarburantes avanzados y RFNBOs en la cuota de energías renovables suministradas al sector del transporte. Dentro de este sub-objetivo, hay un requisito mínimo del 1% de RFNBOs en la cuota de energías renovables suministradas al transporte en 2030. La legislación también aborda el uso de RFNBOs en la industria, con objetivos del 42% para 2030 y 60% para 2035 del hidrógeno utilizado en la industria proveniente de RFNBOs [13].

Además de la RED II, otras normativas europeas relevantes para los biocarburantes y RFNBOs incluyen *ReFuel Aviation EU* [14] y *FuelEU Maritime* [15]. Ambas establecen objetivos para combustibles sostenibles en la aviación (SAFs) y requisitos para reducir la intensidad de GEI de los combustibles marítimos, respectivamente. En el caso del sector de la aviación, se prevé que para el año 2050 el 63 % del combustible utilizado corresponda a combustibles SAF, de los cuales un 28 % deberá ser RFNBOs[14]. Por su parte, el sector marítimo para 2050 deberá alcanzar, una reducción del 80% en la intensidad de emisiones de gases de efecto invernadero. Los combustibles renovables y biocarburantes avanzados pueden contribuir a alcanzar estos objetivos.

En España, la legislación ha ido adaptándose a las directivas europeas. El Real Decreto 376/2022 [16] regula los criterios de sostenibilidad y de reducción de emisiones de GEI de los biocarburantes, biolíquidos y combustibles de biomasa, así como el sistema de garantías de origen de los gases renovables. Este RD modifica el RD 1085/2015 [17], que fomentaba el uso de biocarburantes y establecía obligaciones de venta o consumo. La Orden TED/728/2024 [18] desarrolla el mecanismo de fomento de biocarburantes y otros combustibles renovables con fines de transporte, actualizando el sistema para incluir todo tipo de energía renovable suministrada al transporte, incluyendo los combustibles renovables de origen no biológico. A partir de 2025, permite computar los combustibles líquidos y gaseosos renovables de origen no biológico con un valor doble. Esta orden también modifica la Orden TED 1026/2022 [19], que aprueba el procedimiento de gestión del sistema de garantías de origen del gas procedente de fuentes renovables, permitiendo incluir información sobre criterios de sostenibilidad y reducción de emisiones de GEI para RFNBOs en las garantías de origen.

¹ En el momento de elaborar el documento no se ha realizado la trasposición de la RED III

3. Conceptos de Análisis de Ciclo de Vida.

Para evaluar el verdadero impacto ambiental de estos combustibles renovables, es fundamental emplear una técnica de evaluación integral como el Análisis de Ciclo de Vida (LCA por sus siglas en inglés) [20].

En los combustibles convencionales, como la gasolina o el diésel, la mayor parte de las emisiones se produce durante la combustión. En el caso de los combustibles alternativos, como los renovables, es en etapas previas, como la producción o el procesamiento, donde se pueden producir emisiones. Una evaluación completa del ciclo de vida es crucial para evitar la transferencia de cargas ambientales entre diferentes sectores o regiones de la cadena de valor.

El alcance del LCA para combustibles de transporte se define comúnmente en términos de:

- "Well-to-Tank" (WtT), que incluye las fases de producción y distribución del combustible,
- "Tank-to-Wheels" (TtW), que cubre el uso del combustible, o
- "Well-to-Wheels" (WtW), que abarca todas las fases, desde la extracción de materias primas hasta su uso final.
- Una evaluación más amplia, "Cradle-to-Grave", incluiría también las emisiones generadas por la construcción de la infraestructura necesaria para la producción del combustible, sus materias primas o la fabricación del vehículo.

La figura 1 muestra el alcance de cada una de ellas. Aunque la infraestructura no siempre se incluye en las metodologías de certificación de sostenibilidad actuales en Europa, se considera en análisis más completos.

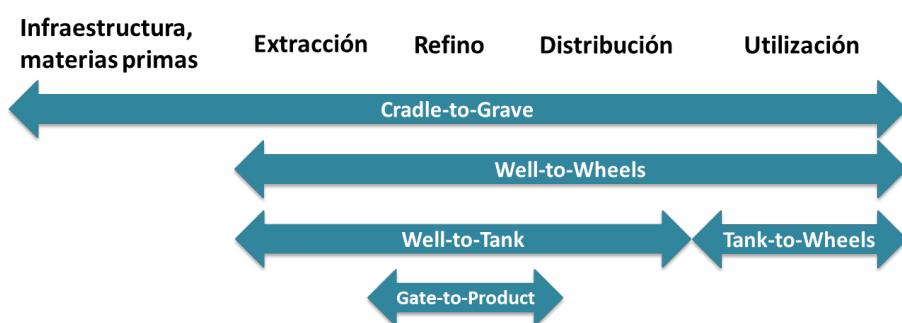


Figura 1. Alcance del Análisis de Ciclo de Vida de producción y uso de combustibles convencionales

La diferencia fundamental y el potencial beneficio climático de los combustibles renovables es el origen del carbono que se libera. Para estos combustibles, el CO₂ utilizado como materia prima se ha capturado previamente directamente de la atmósfera o proviene de fuentes renovables o desechos. Desde la perspectiva de la materia prima se crea un circuito cerrado de carbono. El carbono se toma de la atmósfera (de forma directa

o a través de las materias primas) durante la producción y se devuelve a la atmósfera durante la combustión.

En la bibliografía científica se reconoce que el carbono liberado en la combustión de combustibles renovables puede considerarse como carbono neutral o resultando en un balance neto de CO₂ equivalente cercano a cero o nulo en una evaluación de ciclo de vida (TtW) [20]. La premisa es que el CO₂ liberado ya fue capturado previamente de la atmósfera. A diferencia de los combustibles fósiles, que extraen carbono almacenado en reservas subterráneas e introducen carbono adicional a la atmósfera al ser quemados, los combustibles renovables operan esencialmente un ciclo de carbono que no aumenta la cantidad total de carbono en la atmósfera considerada en el ciclo de vida completo. Las emisiones de CO₂ generadas en la combustión (fase TtW) coincide con la cantidad de CO₂ absorbido de la atmosférica (fase WtT) bien de forma directa (a través de captura directa del aire) o bien de forma indirecta (a través de fotosíntesis). La figura 2 presenta los diferentes alcances definidos en los LCA aplicados a la producción y al uso de combustibles renovables.

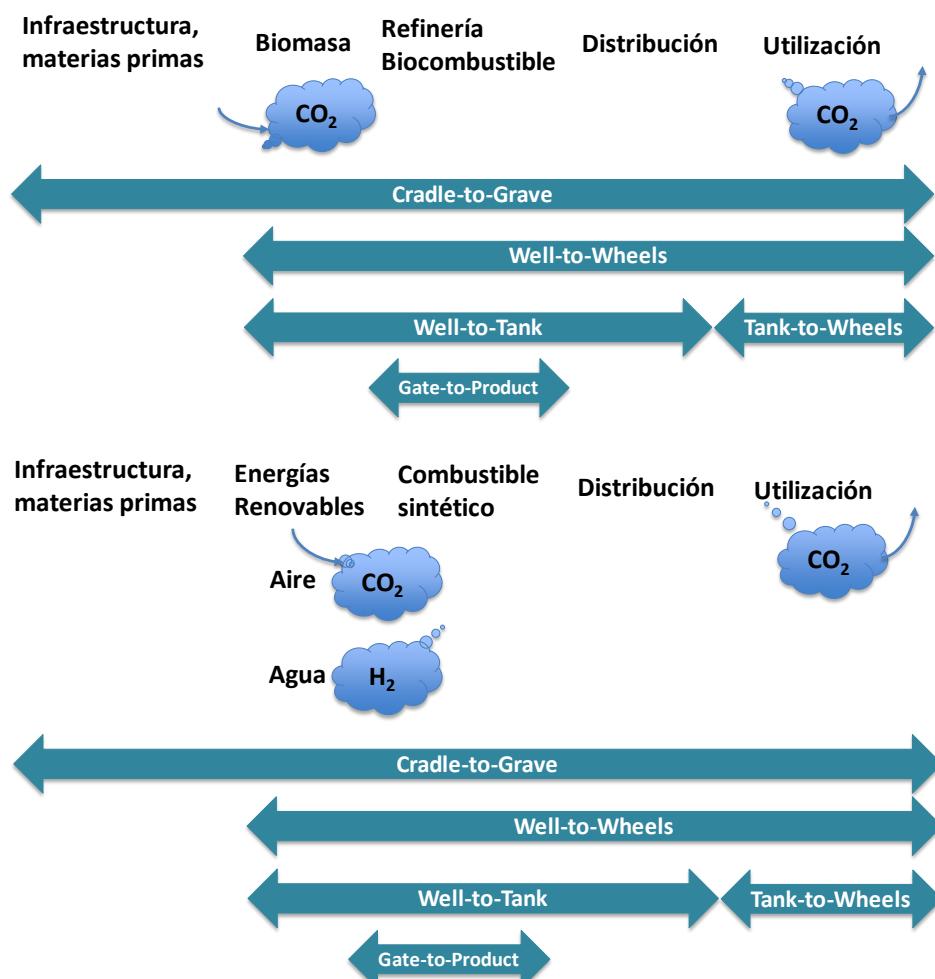


Figura 2. Alcance del Análisis de Ciclo de Vida de producción y uso de combustibles renovables.

4. Producción de Combustibles Renovables.

La producción de combustibles renovables constituye una estrategia clave para avanzar hacia un sistema energético más sostenible y resiliente. Estos combustibles, capaces de sustituir a los derivados del petróleo, pueden obtenerse a partir de tres fuentes principales: biomasa de cultivos energéticos, biomasa y captura de CO₂ con hidrógeno verde.

La biomasa, gracias al proceso de fotosíntesis, capta y fija el dióxido de carbono presente en la atmósfera, quedando así ese carbono fijado en su estructura [21]. Esto hace que este tipo de recurso sea considerado como renovable y con balance neutro de carbono en su utilización. Por ello, su aprovechamiento constituye un pilar fundamental para el desarrollo de una economía energética más sostenible [22][23]. En caso de que la materia prima sea de origen animal, es necesario entender que los animales han ingerido dicha biomasa para su alimentación, por lo que el carbono fijado en el alimento del animal (biomasa) pasa a estar en el animal. Por otro lado, también pueden ser elaborados biocombustibles a partir de captura de CO₂ del aire, la cual al combinarse con hidrógeno de origen renovable da lugar a los llamados e-fuels.

Por lo tanto, la producción de biocombustibles a partir de biomasa (ya sea proveniente de cultivos energéticos, residuos agrícolas, forestales o urbanos) o mediante procesos de captura de CO₂, constituye una estrategia fundamental para avanzar hacia un sistema energético menos dependiente de los combustibles fósiles. Estos biocombustibles tienen el potencial de sustituir parcial o totalmente a los derivados del petróleo en sectores clave como el transporte, la generación eléctrica y la industria, lo que los convierte en una solución innovadora con un elevado potencial para la descarbonización de la industria y el transporte.

4.1. Combustibles Renovables a partir de Biomasa.

La producción de biocombustibles se basa en la transformación de materia orgánica procedente de diversas fuentes en compuestos intermedios tales como aceites o alcohol. Posteriormente, estos productos intermedios se refinan o procesan mediante tecnologías químicas, térmicas o biotecnológicas, dando lugar a biocombustibles líquidos o gaseosos, entre los que destacan el diésel renovable parafínico (HVO), el bioetanol y el biogás. En todos los métodos de obtención de biocombustibles el denominador común es el uso de biomasa como materia prima, ya sea de origen vegetal o animal [24][25]. Esta biomasa, gracias al proceso de fotosíntesis, capta y fija el dióxido de carbono presente en la atmósfera, quedando así ese carbono fijado en su estructura[21]. Esto permite su condición de recurso renovable y con balance neutro de carbono en su utilización. Por ello, su aprovechamiento constituye un pilar fundamental para el desarrollo de una economía energética más sostenible [22][23]. Los procesos más utilizados para la producción de biocombustibles son:

- **Fermentación alcohólica:** Proceso en el cual inicialmente los carbohidratos complejos se hidrolizan para obtener azúcares fermentables, principalmente glucosa. Posteriormente, mediante la acción de levaduras, estos azúcares se transforman en etanol y CO₂. El producto obtenido se somete a un proceso de destilación para concentrar el etanol, seguido de una deshidratación para alcanzar una pureza superior al 99 %. Este método es ampliamente aplicado por su eficiencia y viabilidad económica.
- **Diésel renovable parafínico (HVO):** se produce mediante hidrotratamiento de aceites vegetales o grasas animales, generando hidrocarburos saturados libres de oxígeno, azufre y aromáticos, con un número de cetano elevado (80–99), lo que garantiza un rendimiento similar al gasóleo fósil, que según la norma EN590 exige que el número mínimo de cetano de un diésel sea de 51. De esta forma, se mejora la eficiencia energética y es viable su uso en motores diésel ya existentes sin necesidad de modificaciones [26].
- **Transesterificación:** En este proceso, los triglicéridos presentes en los aceites (vegetales o grasas animales) reaccionan con un alcohol de cadena corta, generalmente metanol, en presencia de un catalizador (habitualmente hidróxido de sodio o potasio). Esta reacción genera ésteres metílicos de ácidos grasos (biodiesel) y glicerina como subproducto. Antes del proceso, el aceite puede requerir pretratamientos como filtrado o desacidificación, especialmente si proviene de residuos. La transesterificación destaca por su eficiencia, bajo costo relativo y aplicabilidad a una amplia variedad de materias primas, lo que la hace dominante en la industria del biodiesel [27].
- **Digestión anaerobia:** Es un proceso biológico en el cual diferentes microorganismos descomponen materia orgánica en ausencia de oxígeno. Las materias primas más comunes incluyen residuos agroindustriales, estiércol, lodos de depuradoras y fracción orgánica de residuos sólidos urbanos. En las últimas décadas, este ámbito ha experimentado una transformación significativa: ha dejado de centrarse exclusivamente en el tratamiento y disposición final de los desechos generados por la sociedad, para convertirse en un sector que aporta de manera relevante al abastecimiento energético y a la recuperación de materiales secundarios [28]. El proceso se desarrolla en digestores cerrados, donde la materia se somete a condiciones controladas de temperatura y pH, favoreciendo la acción de bacterias metanogénicas. El biogás generado está compuesto principalmente por metano (CH₄) y CO₂.

En la actualidad se desarrollan nuevos procesos de obtención de biocombustibles. Estos nuevos procesos buscan superar las limitaciones de las tecnologías convencionales para operar con materias primas no alimentarias y aumentar así la eficiencia energética de los procesos de producción. Entre ellos destacan la **gasificación** de biomasa lignocelulósica

para producir gas de síntesis, que luego se convierte en biocombustibles líquidos mediante el proceso **Fischer-Tropsch**, y la **pirolisis rápida**, que genera bioaceite y biogás, así como también se desarrollan tecnologías de **fermentación de azúcares celulósicos**.

Este conjunto de procesos permite dar valor a los diferentes tipos de biomasa, maximizando así su potencial energético. De esta manera, se ayuda a reducir la dependencia de los combustibles fósiles, disminuyendo las emisiones de gases de efecto invernadero y promoviendo una matriz energética mucho más sostenible. Las tecnologías de producción de biocombustibles han sido ampliamente abordadas en la literatura científica [29][30][31][32][33][34], destacando su potencial como solución energética sostenible. En la Directiva de Energías Renovables (RED) de la UE, las emisiones de los biocombustibles solo consideran la fase WTT, ya que se asume que su combustión es neutra en carbono [35].

Con lo anteriormente expuesto, se concluye que la producción de biocombustibles se basa en el aprovechamiento de compuestos orgánicos cuyo carbono tiene origen biogénico. Es decir, todo el carbono contenido en estos materiales fue inicialmente capturado de la atmósfera por la biomasa durante el proceso de fotosíntesis [36]. De esta forma, se tiene el ciclo mostrado en la Figura 3, donde en la utilización del combustible las emisiones netas de CO₂ son nulas dado que todo el carbono presente en el biocombustible proviene del carbono secuestrado por la biomasa durante su crecimiento. Cuando el biocombustible se utilice se estará liberando el CO₂ ya absorbido, resultando así en un balance neto nulo en la utilización del combustible.

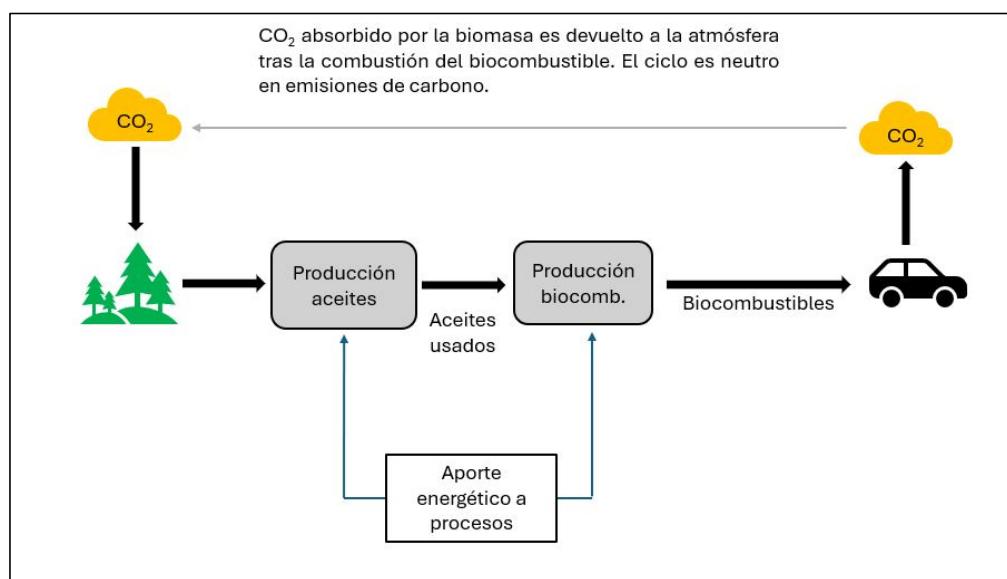


Figura 3. Volumen de control del balance de emisiones de CO₂ empleando aceites usados para la producción de biocombustibles.

Así, la RED II [10], dice que la emisión de los biocombustibles consiste únicamente de las emisiones asociadas a WtT. Si se tiene en cuenta el concepto de emisiones en tubo de escape, sin tener en cuenta la huella de CO₂ asociada a la fabricación del biocombustible, o lo que es lo mismo, TtW según el LCA las emisiones de carbono según este organismo sería cero, cosa que no sucede si tenemos en cuenta un vehículo que funciona con combustibles fósiles.

En este sentido, el IDAE también afirma que la biomasa es un combustible prácticamente nulo en emisiones de CO₂ y que puede jugar un papel fundamental en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo así a reducir el impacto del cambio climático [17][18]. De igual manera, esto también es afirmado por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) [19].

Todas estas afirmaciones son corroboradas por diferentes estudios científicos como se muestra en la Tabla 2, donde se evidencia que los biocombustibles presentan un factor de emisión de CO₂ igual a cero en el análisis TtW. Lo cual dista mucho de los valores promedio encontrados para los combustibles fósiles cuyos valores se sitúan en 72.1 gCO_{2e}/MJ para el diésel, 79.1 para el HFO (*Heavy Fuel Oil*), 56.7 en gCO_{2e}/MJ para el CNG (*Compressed Natural Gas*) y en 96.6 gCO_{2e}/MJ para la gasolina [37]. Por tanto, y como se ha argumentado a lo largo del documento, independientemente del origen de la materia prima utilizada, todo el carbono contenido en la estructura de los biocombustibles proviene de la biomasa. Esto refuerza el concepto de que dichos combustibles puedan considerar como emisiones cero de CO₂ en tubo de escape [38].

Tabla 2. Factores de emisión en la utilización TtW de diversos combustibles renovables.

Combustible	Emisiones TtW (gCO _{2e} /MJ)	Tipo de producción del biocombustible	Referencia bibliográfica
Bioetanol	0	Fermentación alcohólica (trigo, maíz, caña y remolacha)	[38]
Biometano	0	Digestión anaeróbica	[39]
Biometano	0	Gasificación de biomasa lignocelulosa	[40]
Metanol	0	Gasificación de biomasa lignocelulosa	[41]
DME	0	Gasificación de biomasa lignocelulosa	[42]
HVO	0	Transesterificación de aceite de palma	[43]
FT Diésel	0	Gasificación de biomasa lignocelulosa	[44]

De esta forma, aun teniendo en cuenta que los biocombustibles llevan asociada una huella de carbono, esta proviene de los procesos intermedios WtT, pero no del carbono presente en el combustible dado que este proviene de la biomasa inicial, la cual lo ha capturado previamente de la atmósfera. No obstante, al incluir los procesos intermedios de producción, la normativa europea establece que los biocombustibles y los combustibles renovables de origen no biológico (RFNBOs) deben lograr una reducción mínima del 70 % de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en comparación con el combustible fósil de referencia (94 gCO_{2e}/MJ), medida a lo largo del ciclo de vida Well-to-Wheel (WtW).

4.2. Combustibles Renovables a partir de Captura de CO₂ del Aire.

Los combustibles renovables producidos utilizando dióxido de carbono (CO₂) capturado directamente del aire mediante la tecnología de Captura Directa del Aire (DAC por sus siglas en inglés) representan un enfoque particularmente interesante para la descarbonización [4][5][20], especialmente en sectores donde la electrificación directa es compleja, como la aviación [6][45] o el transporte marítimo y pesado [46]. La producción de estos combustibles implica una serie de pasos clave: la generación de hidrógeno a través de electrólisis del agua utilizando energía renovable no biológica, DAC y la síntesis posterior del combustible (como hidrocarburos, metanol o amoníaco) a partir del H₂ y el CO₂ capturados.

El potencial de reducción de CO₂ de los combustibles renovables no es inherentemente neutro en carbono; depende en gran medida de cómo se producen y operan a lo largo de todo su ciclo de vida. Los factores clave que influyen en la intensidad de carbono de los combustibles renovables incluyen la fuente de electricidad utilizada y el suministro de CO₂. La contribución más significativa a las emisiones totales de CO₂ de los combustibles renovables (y de otras alternativas eléctricas al transporte) proviene de la electricidad utilizada, reflejando en este caso la influencia del suministro de H₂ y CO₂. Para ser considerados combustibles renovables deben utilizar energía renovable no biológica en todos los procesos lo cual justifica la descarbonización de este tipo de combustibles.

Este principio de neutralidad de carbono en el uso, dentro de una perspectiva de ciclo de vida, es un pilar fundamental para que los combustibles renovables cumplan con los exigentes criterios de reducción de emisiones establecidos por la legislación, como la Directiva (UE) 2018/2001 [10]. Como se mencionó en la sección anterior, la normativa europea exige que los RFNBOs logren una reducción mínima del 70% de las emisiones de GEI en comparación con el combustible fósil de referencia (94 gCO_{2e}/MJ), calculada a lo largo del ciclo de vida. Al considerar las emisiones totales (E) del ciclo de vida del RFNBO y compararlas con las emisiones del combustible fósil de referencia (EF), la fórmula de reducción es (EF – E) / EF. Si las emisiones de la fase de combustión (TtW) se consideran cero en el balance total debido a la captura previa (como se establece en las fuentes para el cálculo de análisis de ciclo de vida), esto permite que el valor de E sea significativamente menor que EF, facilitando el cumplimiento del objetivo del 70% de reducción.

Ahora bien, ¿qué sucede específicamente durante la fase de utilización o combustión (TtW) de los combustibles renovables, especialmente aquellos producidos a partir de CO₂ capturado del aire mediante DAC? Las referencias científicas confirman que, al igual que los combustibles fósiles, los combustibles renovables sí emiten CO₂ a la atmósfera cuando se queman en un motor de combustión interna. La tasa de emisión de CO₂ durante la combustión puede ser similar o incluso ligeramente menor que la de combustibles fósiles [2][20][45][47]. Sin embargo, la diferencia fundamental y el potencial beneficio climático de los combustibles renovables producidos con DAC radican en el origen del carbono que se libera. Para estos combustibles, el CO₂ utilizado como materia prima se ha capturado previamente directamente de la atmósfera utilizando tecnología DAC. Desde la perspectiva de un análisis de ciclo de vida completo (LCA o WtW), este proceso crea un circuito o "bucle" cerrado de carbono. El carbono se toma de la atmósfera durante la producción (vía DAC) y se devuelve a la atmósfera durante la combustión. De hecho, las fuentes muestran que los combustibles renovables (incluyendo biocombustibles y e-fuels) pueden alcanzar una reducción de casi el 90% sobre una base "*cradle-to-grave*" (incluyendo infraestructura) y podrían acercarse al 100% en una base "*well-to-wheels*" [16].

Es crucial reiterar, como señalan las fuentes, que la viabilidad de este enfoque para lograr bajas emisiones netas de CO₂ depende fundamentalmente de la intensidad de carbono de la energía eléctrica utilizada en todo el proceso de producción [20][45][47]. La producción de H₂ y la captura de CO₂ requieren una cantidad considerable de energía. Si esta electricidad proviene de fuentes bajas en carbono, preferiblemente renovables no biológicas (solar o eólica), las emisiones asociadas a estas etapas se minimizan, permitiendo que el balance neto de CO_{2e} del ciclo de vida completo sea cercano a cero [48].

En conclusión, si bien la combustión de combustibles renovables producidos a partir de CO₂ capturado mediante DAC sí libera CO₂ a la atmósfera, desde la perspectiva de un análisis de ciclo de vida completo, esta emisión se considera parte de un ciclo de carbono cerrado donde el CO₂ fue previamente retirado de la atmósfera durante la producción. Por lo que desde un punto de vista de la utilización del combustible (TtW) las emisiones de CO₂ son nulas. Este enfoque, combinado con el uso de energía renovable en las etapas de producción de H₂ y captura de CO₂, permite que estos combustibles alcancen un balance neto de emisiones de GEI cercano a cero o nulo en su ciclo de vida, cumpliendo así con los criterios de sostenibilidad y los objetivos de reducción de emisiones establecidos por la legislación vigente, como la Directiva (UE) 2018/2001.

5. Conclusiones.

De acuerdo con la revisión de la literatura realizada, existe evidencia sólida y consistente que respalda la afirmación de que, en el análisis de ciclo de vida en la etapa de utilización (TtW), los biocombustibles presentan emisiones netas de CO₂ iguales a cero, independientemente de su origen. Este resultado se fundamenta en el principio de que el CO₂ generado durante el proceso de combustión es previamente capturado por las materias primas en su proceso de fotosíntesis. Por tanto, el CO₂ liberado no representa una adición neta a la atmósfera, sino parte de un ciclo cerrado de carbono. Esta característica es una de las principales razones por las cuales los biocombustibles son considerados en todas las referencias como opciones sostenibles para la descarbonización del sector transporte.

Igualmente, y de acuerdo a las fuentes bibliográficas consultadas, existe evidencia sólida y consistente que respalda la afirmación de que, en el análisis de ciclo de vida en la etapa de utilización (TtW) de combustibles renovables producidos a partir de CO₂ capturado mediante DAC, estos presentan emisiones netas de CO₂ iguales a cero. A diferencia de los biocombustibles, cuyo CO₂ se captura de manera natural a través de la fotosíntesis, los e-fuels dependen de la captura de CO₂ atmosférico, así como del uso de hidrógeno producido con electricidad renovable no biológica. Cuando estas condiciones se cumplen, el CO₂ emitido durante la combustión es equivalente al previamente capturado, lo que permite configurar un ciclo de carbono cerrado similar al de los biocombustibles. Esta similitud en el comportamiento TtW refuerza su consideración como una opción viable y sostenible para la descarbonización del transporte.

6. Referencias.

- [1] Martins T, Barreto AC, Souza FM, Souza AM. Fossil fuels consumption and carbon dioxide emissions in G7 countries: Empirical evidence from ARDL bounds testing approach. *Environ Pollut* 2021;291:118093. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2021.118093>.
- [2] European Union Joint Research Centre. Renewable Fuels of Non-Biological Origin in the EuropeanUnion. 2023. <https://doi.org/10.2760/998267>.
- [3] Benajes J, García A, Monsalve-Serrano J, Guzmán-Mendoza M. A review on low carbon fuels for road vehicles: The good, the bad and the energy potential for the transport sector. *Fuel* 2024;361. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130647>.
- [4] Galimova T, Ram M, Bogdanov D, Fasihi M, Khalili S, Gulagi A, et al. Global demand analysis for carbon dioxide as raw material from key industrial sources and direct air capture to produce renewable electricity-based fuels and chemicals. *J Clean Prod* 2022;373:133920. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133920>.
- [5] Boretti A. Advancements in E-Fuel combustion systems for a sustainable energy future. *Int J Hydrogen Energy* 2024;79:258–66. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.07.006>.
- [6] Colelli L, Segneri V, Bassano C, Vilardi G. E-fuels, technical and economic analysis of the production of synthetic kerosene precursor as sustainable aviation fuel. *Energy Convers Manag* 2023;288:117165. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117165>.
- [7] Biofuels D, Malik K, Capareda SC, Raj Kamboj B, Malik S, Singh K, et al. Biofuels Production: A Review on Sustainable Alternatives to Traditional Fuels and Energy Sources. *Fuels* 2024, Vol 5, Pages 157-175 2024;5:157–75. <https://doi.org/10.3390/FUELS5020010>.
- [8] Du C, Zhao X, Liu D, Lin CSK, Wilson K, Luque R, et al. Introduction: An overview of biofuels and production technologies. *Handb Biofuels Prod Process Technol* Second Ed 2016:3–12. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100455-5.00001-1>.
- [9] Tenhumberg N. EU Regulatory Compliance of Renewable Fuels from Steel Mill Gases and Exhaust Gases. *Chemie-Ingenieur-Technik* 2024;96:1299–309. <https://doi.org/10.1002/CITE.202400023;SUBPAGE:STRING:FULL>.
- [10] Comisión Europea. Directiva (UE) 2018/2001 del Parlamento Europeo y del Consejo de 11 de diciembre de 2018 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables. *D Of La Union Eur* 2018;2018:141–4.
- [11] Comisión Europea. REGLAMENTO DELEGADO (UE) 2023/1184 DE LA COMISIÓN de 10 de febrero de 2023por el que se completa la Directiva (UE) 2018/2001 del Parlamento Europeo y del Consejo estableciendo una metodología común de la Unión en la que se definan normas detalladas para 2023:11–9.
- [12] Comisión Europea. REGLAMENTO DELEGADO (UE) 2023/1185 DE LA COMISIÓN de 10 de febrero de 2023 2023:20–33.

- [13] Comisión Europea. Directiva (UE) 2023/2413 del Parlamento Europeo y del Consejo de 18 de octubre de 2023 2023;2413:1–77.
- [14] Comisión Europea. Reglamento relativo a la garantía de unas condiciones de competencia equitativas para un transporte aéreo sostenible (ReFuelEU Aviation). D Of La Unión Eur 2023;2405:1–30.
- [15] Comisión Europea. Reglamento (UE) 2023/1805 del Parlamento Europeo y del Consejo de 13 de septiembre de 2023 relativo al uso de combustibles renovables y combustibles hipocarbónicos en el transporte marítimo y por el que se modifica la Directiva 2009/16/CE. D Of La Unión Eur Ser L 2023;2023:48–100.
<https://doi.org/10.2771/793264.22.9.2023>.
- [16] BOE. Real Decreto 376/2022, de 17 de mayo, por el que se regulan los criterios de sostenibilidad y de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero de los biocarburantes, biolíquidos y combustibles de biomasa, así como el sistema de garantías de or 2022.
- [17] BOE. Real Decreto 1085/2015, de 4 de diciembre, de fomento de los Biocarburantes. BOE 2016:32–3.
- [18] BOE. Orden TED/728/2024, de 15 de julio, por la que se desarrolla el mecanismo de fomento de biocarburantes y otros combustibles renovables con fines de transporte 2024:88977–9038.
- [19] BOE. Order TED/1026/2022, of 28 October, approving the procedure for the management of the system of guarantees of origin of gas from renewable sources. from renewable sources. Orden TED/1026/2022, de 28 de octubre, por la que se aprueba el procedimiento de ge 2022.
- [20] Uchida N, Onorati A, Novella R, Agarwal AK, Abdul-Manan AFN, Kulzer AC, et al. E-fuels in IC engines: A key solution for a future decarbonized transport. Int J Engine Res 2025. <https://doi.org/10.1177/14680874251325296>.
- [21] Bernal B, Murray LT, Pearson TRH. Global carbon dioxide removal rates from forest landscape restoration activities. Carbon Balanc Manag n.d.;13.
<https://doi.org/10.1186/s13021-018-0110-8>.
- [22] Qamar SHQH, Ali MM, Rehman HU. Comprehensive Review of Bioenergy Sustainability: Balancing Economic, Environmental, and Social Impacts. J Lat Am Sci Cult n.d.;6:47–65,. <https://doi.org/10.52428/27888991.v6i9.1186>.
- [23] Ali F. Fueling the future: biomass applications for green and sustainable energy. Dec n.d.;01. <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00309-z>.
- [24] Ahorsu R, Medina F, Constantí M. Significance and challenges of biomass as a suitable feedstock for bioenergy and biochemical production: A review. Dec. 01, 2018, MDPI AG, n.d. <https://doi.org/10.3390/en11123366>.
- [25] Quevedo-Amador RA. Application of waste biomass for the production of biofuels and catalysts: a review. Apr n.d.;01. <https://doi.org/10.1007/s10098-023-02728-4>.
- [26] Aatola H, Larmi M, Sarjovaara T, Mikkonen S. Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) as a Renewable Diesel Fuel: Trade-off between NOx, Particulate Emission, and Fuel

- Consumption of a Heavy Duty Engine. SAE Int J Engines 2008;1:1251–62. <https://doi.org/10.4271/2008-01-2500>.
- [27] Yusuf NNAN, Kamarudin SK, Yaakub Z. Overview on the current trends in biodiesel production. Energy Convers Manag 2011;52:2741–51. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2010.12.004>.
- [28] Astrup TF, Tonini D, Turconi R, Boldrin A. Life cycle assessment of thermal Waste-to-Energy technologies: Review and recommendations. Waste Manag n.d.;37:104–15. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.06.011>.
- [29] Suzihaque MUH, Alwi H, Kalthum Ibrahim U, Abdullah S, Haron N. Biodiesel production from waste cooking oil: A brief review. Mater Today Proc 2022;63:S490–5. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2022.04.527>.
- [30] Ali UJ. PRODUCTION OF BIODIESEL FROM USED COOKING OIL n.d.
- [31] Monika SB, Pathak V V. Biodiesel production from waste cooking oil: A comprehensive review on the application of heterogenous catalysts. Jun n.d.;01. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100209>.
- [32] Shaban SA. Biodiesel production from waste cooking oil n.d. <https://doi.org/10.18510/ijstrm.2015.383>.
- [33] Kulkarni MG, Dalai AK. Waste cooking oil - An economical source for biodiesel: A review. Apr n.d.;26. <https://doi.org/10.1021/ie0510526>.
- [34] Bhavani AG, Sharma VK. Production of Biodiesel from Waste Cooking Oil: A Review. J Adv Chem Sci n.d.;4:549–555,. <https://doi.org/10.30799/jacs.181.18040105>.
- [35] Comisión Europea. DIRECTIVA (UE) 2023/2413 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 18 de octubre de 2023 por la que se modifican la Directiva (UE) 2018/2001, el Reglamento (UE) 2018/1999 y la Directiva 98/70/CE en lo que respecta a la promoción de la energía procedente de 2023;2413:1–77.
- [36] Biorrefinerías para convertir residuos vegetales en combustible renovable | Consejo Superior de Investigaciones Científicas n.d. https://www.csic.es/es/actualidad-del-csic/biorrefinerias-para-convertir-residuos-vegetales-en-combustible-renovable?utm_source=chatgpt.com (accessed May 24, 2025).
- [37] Gray N, McDonagh S, O’Shea R, Smyth B, Murphy JD. Decarbonising ships, planes and trucks: An analysis of suitable low-carbon fuels for the maritime, aviation and haulage sectors. Adv Appl Energy 2021;1:100008. <https://doi.org/10.1016/J.ADAPEN.2021.100008>.
- [38] Sims REH, Hastings A, Schlamadinger B, Taylor G, Smith P. Energy crops: Current status and future prospects. Glob Chang Biol 2006;12:2054–76. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2486.2006.01163.X>;JOURNAL:JOURNAL:13652486;WGROUP:STRING:PUBLICATION.
- [39] Long A, Murphy JD. Can green gas certificates allow for the accurate quantification of the energy supply and sustainability of biomethane from a range of sources for renewable heat and or transport? Renew Sustain Energy Rev 2019;115:109347.

- <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2019.109347>.
- [40] Alamia A, Magnusson I, Johnsson F, Thunman H. Well-to-wheel analysis of bio-methane via gasification, in heavy duty engines within the transport sector of the European Union. *Appl Energy* 2016;170:445–54.
<https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2016.02.001>.
- [41] Holmgren KM, Andersson E, Berntsson T, Rydberg T. Gasification-based methanol production from biomass in industrial clusters: Characterisation of energy balances and greenhouse gas emissions. *Energy* 2014;69:622–37.
<https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2014.03.058>.
- [42] Silalertruksa T, Gheewala SH, Sagisaka M, Yamaguchi K. Life cycle GHG analysis of rice straw bio-DME production and application in Thailand. *Appl Energy* 2013;112:560–7. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2013.06.028>.
- [43] Power-to-liquids: Potentials and Perspectives for the Future Supply of ... - Patrick Schmidt, Werner Weindorf, Arne Roth, Valentin Batteiger, Florian Riegel - Google Książki n.d.
https://books.google.es/books/about/Power_to_liquids.html?hl=pl&id=20YnzbEACAAJ&redir_esc=y (accessed May 30, 2025).
- [44] Cherubini F, Bird ND, Cowie A, Jungmeier G, Schlamadinger B, Woess-Gallasch S. Energy- and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations. *Resour Conserv Recycl* 2009;53:434–47.
<https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2009.03.013>.
- [45] Gray N, O’Shea R, Smyth B, Lens PNL, Murphy JD. The role of direct air carbon capture in decarbonising aviation. *Renew Sustain Energy Rev* 2024;199:114552.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114552>.
- [46] Carvalho F, Müller-Casseres E, Poggio M, Nogueira T, Fonte C, Wei HK, et al. Prospects for carbon-neutral maritime fuels production in Brazil. *J Clean Prod* 2021;326:129385. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129385>.
- [47] Lindstad E, Ask TØ, Cariou P, Eskeland GS, Rialland A. Wise use of renewable energy in transport. *Transp Res Part D Transp Environ* 2023;119.
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103713>.
- [48] João Roberto FS, Ribeiro JB, Durães L. e-Fuel production process technologies and trends: A bibliometric-based review. *Energy Reports* 2025;13:3351–68.
<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.02.030>.
- [49] Harris A, Soban D, Smyth BM, Best R. Assessing life cycle impacts and the risk and uncertainty of alternative bus technologies. *Renew Sustain Energy Rev* 2018;97:569–79. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2018.08.045>.
- [50] IDAE. Consumo y emisiones de CO₂ n.d. https://coches.idae.es/consumo-de-carburante-y-emisiones?utm_source=chatgpt.com (accessed May 24, 2025).
- [51] Rahman MM, Canter C, Kumar A. Well-to-wheel life cycle assessment of transportation fuels derived from different North American conventional crudes. *Appl Energy* 2015;156:159–73. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2015.07.004>.

7. Anexos

Las emisiones de ciclo de vida (WTW) se emplean para evaluar combustibles alternativos para el transporte y son, quizás, los criterios más cruciales a considerar [49]. Los estudios *Well-to-Wheels*, WTW comprenden la fase *Well-to-Tank*, WTT, que abarca la recuperación/producción de la materia prima/producto, la conversión de energía, la entrega y el almacenamiento, y la fase *Tank-to-Wheels* TTW, que incluye la conversión a bordo del portador de energía para proporcionar propulsión.

Los factores de emisión *Well-to-Wheels* (WTW), *Well-to-Tank* (WTT) y *Tank-to-Wheels* (TTW) para diversos combustibles fósiles por MJ de combustible se muestran en la Tabla 1 de los anexos. Se observa como referencia que las emisiones de CO₂ en la utilización del combustible TtW para combustibles fósiles sitúan al diésel en 72.1 gCO_{2e}/MJ, 79.1 para el HFO (*Heavy Fuel Oil*), 56.7 en gCO_{2e}/MJ para el CNG (*Compressed Natural Gas*) y en 96.6 gCO_{2e}/MJ para la gasolina. En unidades volumétricas, el IDAE ofrece como datos promedios que, por cada litro de gasolina consumido, un coche emite 2.35 kg de CO₂, y por cada litro de gasóleo unos 2.64 kg de CO₂ [50]. Es necesario señalar que, aunque estos valores son orientativos, las emisiones reales en un LCA pueden variar significativamente en función de diversos factores, como la eficiencia del vehículo y las condiciones de operación conducción [37].

La normativa europea exige que los RFNBOs y los biocombustibles convencionales logren una reducción mínima del 70% y 65% [12] de las emisiones de GEI en comparación con el combustible fósil de referencia (94 gCO_{2eq}/MJ), calculada a lo largo del ciclo de vida WtT.

Tabla 1. Factores de emisión WTW, WTT y TTW para diversos combustibles fósiles [37].

CO ₂ emissions gCO _{2e} /MJ	Well-to-Tank WtT	Tank-to-Wheel TtW	Well-to-Wheel WtW
Diesel	17.4	72.1	89.5
Jet Fuel	15.0	72.4	87.4
HFO	15.0	79.1	94.1
Gasolina [51]	21.5	75.1	96.6
CNG	10.9	56.7	67.6
LNG	19.6	56.9	76.5

