



Universidad Internacional de La Rioja
Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología

Máster Universitario en Dirección Logística

Estimación del impacto económico de la gestión ecológica de una empresa de transporte

Trabajo presentado por:	Ing. Germán Reyes Ruiz
Tipo de trabajo:	Trabajo de Fin de Máster - Individual
Tipología de Trabajo:	Desarrollo de Metodologías
Director:	Ing. Juan Isacio Castillo Tello, MBA, PhD
Fecha:	22 de julio de 2021

Resumen

En este documento se estima el impacto económico y ambiental asociado a la transición ecológica de una empresa logística del transporte de mercancías por carretera. Para ello se ha diseñado y aplicado una metodología que serviría como herramienta de gestión para facilitar y respaldar la transición ecológica en empresas de este sector logístico.

La metodología propuesta para evaluar el impacto económico y ambiental se validó aplicando las condiciones de un caso supuesto: una empresa de transporte de mercancías por carretera, con sede en España, que realiza recorridos en el territorio de la Unión Europea.

Realizando la comparación de costes y emisiones asociados a la operación de dos vehículos con motor de combustión interna (Freightliner Cascadia® y Kenworth T680 Next Gen®) y dos vehículos eléctricos (Tesla Semi® y Lion Electric eLion8T®) durante un año, se determinó que las alternativas eléctricas presentan una reducción de costes de hasta el 14,87 %, respecto a las alternativas diésel. Además, de acuerdo con diferentes referencias y proyecciones, se obtuvo una reducción en las emisiones de dióxido de carbono de hasta el 164,28 % (año 2020) y hasta el 465,10 % (año 2030).

Por otra parte, a largo plazo, se determinó que las opciones eléctricas presentan una reducción de costes acumulados de hasta el 16,41 %, respecto a las alternativas que emplean combustible fósil, para un período de ocho años. Adicionalmente, la reducción acumulada de emisiones de dióxido de carbono que presentan las opciones ecológicas, se estimó en un 227,38 %, para el período 2019 - 2030.

Finalmente, se analizó también en este estudio el impacto ambiental y social relacionado con los procesos alternativos de generación de energía eléctrica que no involucran el uso de combustibles fósiles. Se destacó la importancia de las regulaciones y normativas a nivel local y regional para el control de las emisiones, y se revisaron diferentes estrategias para la mitigación del impacto, encontrándose como más efectivas la participación de las comunidades en los proyectos de desarrollo de infraestructuras y la promoción del uso de alternativas ecológicas para la generación de energía eléctrica.

Palabras clave: Huella de carbono, Logística verde, Planificación del transporte, Vehículos eléctricos.

Abstract

The economic and environmental impact associated with the ecological transition of a road freight transport company is presented in this document. A methodology was designed and applied, in order to work as a management tool to facilitate and support the ecological transition in companies of the logistics transportation sector.

The methodology designed in this document to evaluate the economic and environmental impact was validated applying hypothetical case conditions: a road freight transport company based in Spain, which makes journeys all across the European Union territory.

The costs and emissions associated to one year operation of two internal combustion engine vehicles (Freightliner Cascadia® and Kenworth T680 Next Gen®) and two electric vehicles (Tesla Semi® and Lion Electric eLion8T®) were compared. It was shown that the electric alternatives present up to 14,87 % in costs reduction, compared with the diesel alternatives. Furthermore, following different references and projections, it was evidenced that the electric alternatives present considerable reductions in carbon dioxide emissions, which go up to 164,28 % (for 2020) and 465,10 % (for 2030).

In the long term, for an eight-year period, it was determined that the electric alternatives showed costs reductions up to 16,41 %, compared with the internal combustion engine alternatives. Additionally, the accumulated carbon dioxide emissions reduction, presented by the ecologic alternatives, was estimated in 227,38 %, for the 2019 - 2030 term.

Finally, this study analyzed the environmental and social impact related to alternative processes in electric energy generation, independent of fossil fuels. The importance of local and regional regulations for emissions control and reduction was highlighted, and different strategies for impact mitigation were presented, encountering that those which involve communities' participation in infrastructure development projects and promote the use of ecologic alternatives for electricity generation were more effective.

Keywords: Carbon footprint, Green logistics, Transport management, Electric Vehicles.

Índice de Contenidos

1. Introducción	11
1.1. Justificación.....	12
1.2. Finalidad del trabajo	13
1.3. Objetivos	13
1.3.1. Objetivo general	13
1.3.2. Objetivos específicos	13
2. Análisis del contexto y estado del arte	15
2.1. Análisis del contexto	15
2.1.1. Los indicadores de emisiones globales.....	15
2.1.2. Regulaciones aplicables a la gestión ecológica del transporte	19
2.1.3. Principales acuerdos internacionales para la reducción de emisiones.....	21
2.2. Estado del arte	22
2.2.1. Estudios de evaluación del desempeño de la gestión ecológica	22
2.2.2. Soluciones tecnológicas para una transformación verde	24
3. Marco conceptual	28
3.1. Costes asociados a la logística del transporte de carga por carretera	28
3.2. Cálculo de la huella de carbono.....	31
3.2.1. Calculadora usada para los vehículos de combustible fósil	31
3.2.2. Valores propuestos para los vehículos eléctricos	31
4. Metodología	34
4.1. Descripción del proceso metodológico	34
4.2. Cronograma de actividades	34
4.3. Diagrama de flujo.....	35

5.	Desarrollo	36
5.1.	Propuesta metodológica de solución	36
5.1.1.	Descripción de la propuesta	36
5.1.2.	Diagrama de procesos	38
5.2.	Caso de estudio para validación	40
5.2.1.	Condiciones de la simulación para validación	40
5.3.	Proceso de implementación de la metodología	47
5.3.1.	Identificación de costes independientes del vehículo	47
5.3.2.	Aplicación de costes dependientes del vehículo	49
5.4.	Desempeño de la alternativa propuesta a largo plazo	55
5.4.1.	Clasificación de los costes según su tipología	55
5.4.2.	Evaluación de la variación porcentual en el tiempo	56
5.4.3.	Estimación de la generación de emisiones	60
6.	Resultados	62
6.1.	Costes de la operación logística	62
6.1.1.	Costes aplicables a los vehículos diésel	63
6.1.2.	Costes aplicables a los vehículos eléctricos	65
6.1.3.	Comparación de costes de operación	67
6.2.	Impacto ambiental de la operación logística	69
6.2.1.	Emisiones estimadas para los vehículos diésel	69
6.2.2.	Emisiones estimadas para los vehículos eléctricos	70
6.2.3.	Comparación de emisiones anuales generadas	73

6.3.	Modelo de gestión ecológica a largo plazo	75
6.3.1.	Metodología de cálculo de los costes a largo plazo	75
6.3.2.	Rentabilidad de la operación de los vehículos diésel.....	76
6.3.3.	Rentabilidad de la operación de los vehículos eléctricos.....	77
6.3.4.	Comparación de la rentabilidad a largo plazo.....	79
6.3.5.	Generación de emisiones a largo plazo.....	80
6.4.	Propuesta de valoración multicriterio	83
6.4.1.	Propuesta de matriz multicriterio	83
6.4.2.	Aplicación al caso propuesto	86
6.5.	Impacto asociado a la propuesta ecológica.....	90
6.5.1.	Impacto ambiental y social en la generación de energías limpias	90
6.5.2.	Impacto ambiental y social relacionado con las baterías eléctricas	92
6.5.3.	Propuestas de mejora para la reducción del impacto.....	93
7.	Conclusiones y trabajos futuros	94
7.1.	Conclusiones	94
7.2.	Limitaciones encontradas y líneas futuras de desarrollo	95
7.2.1.	Limitaciones.....	95
7.2.2.	Líneas futuras de desarrollo	95
	Referencias bibliográficas.....	96
Anexo A.	Datos de los indicadores de emisiones globales.....	109
Anexo B.	Condiciones para la validación	114
Anexo C.	Variación de la operación a largo plazo	116
Anexo D.	Variación acumulada de los factores de operación	122
Anexo E.	Índice de acrónimos	131
Anexo F.	Índice de elementos y compuestos químicos	132

Índice de Figuras

Figura 1. Distribución de las emisiones asociadas al transporte por sector.	17
Figura 2. Incremento de la temperatura media anual por región.	17
Figura 3. Distribución de las emisiones de CO ₂ en Latinoamérica.	18
Figura 4. Diagrama de Gantt para el desarrollo del proyecto.	34
Figura 5. Diagrama de flujo propuesto para la metodología.	35
Figura 6. Desarrollo de metodología de solución, fases 1 y 2.	38
Figura 7. Desarrollo de metodología de solución, fases 3, 4 y 5.	39
Figura 8. Freightliner Cascadia®.	41
Figura 9. Kenworth T680 Next Gen®.	41
Figura 10. Tesla Semi®.	43
Figura 11. Lion Electric eLion8T®.	44
Figura 12. Variación de la inflación.	56
Figura 13. Variación del salario neto promedio.	57
Figura 14. Variación de los costes fiscales.	58
Figura 15. Evolución del precio neto del combustible.	58
Figura 16. Cambio del precio neto de la energía eléctrica.	59
Figura 17. Distribución de costes anuales para el Freightliner Cascadia®.	64
Figura 18. Distribución de costes anuales para el Kenworth T680 Next Gen®.	64
Figura 19. Distribución de costes anuales para el Tesla Semi®.	66
Figura 20. Distribución de costes anuales para el Lion Electric eLion8T®.	66
Figura 21. Diferencia de los costes anuales de operación.	68
Figura 22. Estimación de emisiones para los vehículos diésel.	70
Figura 23. Estimación de emisiones para los vehículos eléctricos.	72
Figura 24. Evolución de los costes a largo plazo del Freightliner Cascadia®.	76

Figura 25. Evolución de los costes a largo plazo del Kenworth T680 Next Gen®	77
Figura 26. Evolución de los costes a largo plazo del Tesla Semi®.	78
Figura 27. Evolución de los costes a largo plazo del Lion Electric eLion8T®.	78
Figura 28. Comparación de los costes acumulados a largo plazo.	80
Figura 29. Variación de las emisiones anuales a largo plazo.....	82
Figura 30. Comparación de las emisiones acumuladas a largo plazo.	82

Índice de Tablas

Tabla 1. Características de los vehículos propulsados con combustible fósil	43
Tabla 2. Características de los vehículos propulsados con motor eléctrico.....	46
Tabla 3. Estimación de costes anuales independientes del vehículo.....	48
Tabla 4. Estimación de costes anuales aplicables a los vehículos de combustión interna	51
Tabla 5. Estimación de costes anuales aplicables a los vehículos eléctricos	53
Tabla 6. Estimación de costes anuales aplicables al semirremolque.....	54
Tabla 7. Variación promedio anual de los costes de operación.....	59
Tabla 8. Proyección de las emisiones a largo plazo.....	61
Tabla 9. Costes anuales totales para los vehículos de combustión interna.....	63
Tabla 10. Costes anuales totales para los vehículos eléctricos	65
Tabla 11. Emisiones anuales asociadas a la operación de transporte	73
Tabla 12. Comparación de costes totales a largo plazo	79
Tabla 13. Comparación de emisiones acumuladas a largo plazo.....	81
Tabla 14. Matriz multicriterio propuesta	85
Tabla 15. Matriz multicriterio aplicada al caso propuesto.....	89
Tabla 16. Emisiones de gases de efecto invernadero por modo de transporte	109
Tabla 17. Variación de la temperatura media anual en Latinoamérica y el Caribe	109
Tabla 18. Emisiones de CO ₂ en los países de Latinoamérica y el Caribe en el año 2016	112
Tabla 19. Coste de la electricidad en Europa	114
Tabla 20. Inflación anual.....	116
Tabla 21. Salario neto promedio	117
Tabla 22. Impuestos vehiculares	118
Tabla 23. Coste del combustible diésel	119
Tabla 24. Coste de la energía eléctrica.....	120

Tabla 25. Variación anual del factor de emisiones.....	121
Tabla 26. Costes a largo plazo del Freightliner Cascadia® para el contexto español.....	122
Tabla 27. Costes a largo plazo del Freightliner Cascadia® para el contexto europeo.....	123
Tabla 28. Costes a largo plazo del Kenworth T680 Next Gen® para el contexto español	124
Tabla 29. Costes a largo plazo del Kenworth T680 Next Gen® para el contexto europeo	125
Tabla 30. Costes a largo plazo del Tesla Semi® para el contexto español	126
Tabla 31. Costes a largo plazo del Tesla Semi® para el contexto europeo	127
Tabla 32. Costes a largo plazo del Lion Electric eLion8T® para el contexto español	128
Tabla 33. Costes a largo plazo del Lion Electric eLion8T® para el contexto europeo	129
Tabla 34. Variación acumulada de las emisiones	130

1. Introducción

En el transcurso de las últimas dos décadas, se ha demostrado cada vez más la necesidad de que las empresas se interesen y tomen conciencia del impacto ambiental directo e indirecto generado por sus actividades. Sin embargo, al existir pocos estudios aplicados a la revisión de la relación coste-beneficio de la gestión ecológica, muchas empresas optan por seguir realizando sus procesos habituales en la cadena de suministro, sin evaluar el impacto económico y ecológico que implica una transformación “verde” de sus operaciones.

De acuerdo con la investigación desarrollada por Albuquerque et al. (2020), el sector del transporte, en su totalidad, contribuye con aproximadamente un 20 % de las emisiones globales de dióxido de carbono (CO₂), uno de los gases que generan efecto invernadero. Además, según Sims et al. (2014), este porcentaje varía desde un 30 % en países de ingresos altos, hasta menos del 3 % en países subdesarrollados. Del total de la contribución del sector del transporte a las emisiones globales, se encontró que, en 2018, hasta un 29,4 % está formado por las emisiones del transporte de carga por carretera (Ritchie, 2020).

Con el fin de promover la transición ecológica en las empresas de transporte terrestre de mercancías, algunos países han optado por establecer impuestos ambientales aplicables a vehículos de combustible fósil, al combustible mismo o a la circulación de los vehículos (Alcívar Valencia, 2016).

Por otra parte, entidades globales, como la Organización de las Naciones Unidas (ONU), promueven políticas para la implementación de sistemas de transporte sostenibles (2015); o plantean esfuerzos para la reducción de emisiones mediante acuerdos internacionales, como el Acuerdo de París (2016). Además, diferentes entidades gubernamentales locales, como la Junta de Andalucía (2007) en España, proponen desafíos y oportunidades asociadas a un transporte más limpio.

Reconociendo la importancia de la logística y el transporte en la sostenibilidad de una empresa (Jiménez Herrero, 2011) (Martín, 2019), se desarrolla en este Trabajo de Fin de Máster, dentro de la línea de investigación de planificación y gestión del transporte, un estudio económico para justificar la necesidad y rentabilidad de promover un cambio ecológico, tomando como base un caso supuesto de una empresa de transporte de mercancías por carretera, con sede en España, que realiza recorridos en el territorio de la Unión Europea.

En este trabajo se presenta una compilación de los estudios e innovaciones más relevantes hasta la fecha, acompañados de datos que ilustran el entorno actual. Además, se detallan los costes más importantes asociados a la operación de una empresa de transporte terrestre de mercancías, y se propone una metodología de transición ecológica.

Adicionalmente, se estudia el impacto de la metodología propuesta sobre los costes de la empresa, y se analizan las consecuencias ambientales de la transición propuesta. Con base en los resultados obtenidos, se presentan nuevas alternativas y propuestas para estudios posteriores.

1.1. Justificación

Este estudio se plantea por el interés en estimar el efecto que genera un cambio ecológico sobre el desempeño en la logística del transporte, tanto desde un punto de vista económico como ambiental; ya que, si éste es favorable, puede dar lugar a diferentes iniciativas positivas en la planificación del transporte y de las flotas de transporte.

Adicionalmente, se propone el estudio porque no se encontró en los diferentes buscadores (*Google Scholar, Repositorio Digital de la UNIR*) ningún trabajo similar, que compare los costes asociados al transporte por carretera de contenedores empleando vehículos con motor de combustible fósil con respecto a vehículos con motor eléctrico. Es, por ello, un trabajo novedoso y aplicable a la planificación logística de los sistemas de transporte y movilidad.

Como futuro profesional en el área de logística, considero de gran importancia disponer de herramientas que permitan a las empresas de transporte de mercancías hacer la transición a una gestión ecológica de sus procesos y operaciones. Creo que no basta con imponer normativas y regulaciones para disminuir el impacto ambiental de las operaciones, sino que hay que proponer elementos para poner en práctica de forma eficiente los cambios adecuados.

Durante mis pasantías en la empresa Transoceánica Cía. Ltda., con sede en Guayaquil (Ecuador), tuve la oportunidad de interactuar con diferentes agentes involucrados en el transporte de mercancías por vía terrestre y aérea. En este período, pude constatar las dificultades que se encuentran a nivel local y regional para implementar cambios de gestión ecológica, debido a la carencia de normativas y regulaciones para disminuir el impacto

ambiental de las operaciones, así como la ausencia de elementos para poner en práctica de forma eficiente los cambios adecuados.

Como Ingeniero Aeronáutico especializado en Logística, aspiro a trabajar en una empresa de diseño y manufactura de vehículos, o en empresas del sector del transporte, y así poder aplicar los conocimientos y la experiencia adquiridos durante el desarrollo de este Trabajo de Fin de Máster en los procesos de gestión ecológica del sector logístico.

1.2. Finalidad del trabajo

Con la metodología propuesta, se pretende estudiar numéricamente la viabilidad económica que presenta para una empresa de transporte el asumir o no una alternativa de gestión y transición ecológica, mediante la incorporación de vehículos modernos que cuentan con las últimas tecnologías energéticas. Se pretende validar la metodología utilizando un caso supuesto y mostrar, a lo largo del trabajo, argumentos que respalden esta viabilidad.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Desarrollar una metodología para estimar el impacto económico y ambiental de la gestión ecológica de una empresa logística de transporte de mercancías por carretera.

1.3.2. Objetivos específicos

- Estimar los costes asociados al transporte de mercancías por carretera para una flota compuesta por vehículos con motor de combustible fósil y para una flota compuesta por vehículos con motor eléctrico.
- Relacionar el impacto ambiental generado por las operaciones de transporte de mercancías por carretera usando vehículos con motor de combustible fósil y vehículos con motor eléctrico.
- Comparar los costes logísticos de transporte y el impacto ambiental para diferentes opciones de gestión ecológica (empleo de vehículos con motor de combustión interna o uso de vehículos con motor eléctrico).

- Establecer y evaluar una propuesta de gestión que presente la mayor rentabilidad a largo plazo, y encontrar la opción (vehículo con motor de combustión interna o vehículo eléctrico) que genere menor impacto ambiental durante las operaciones de una empresa de transporte terrestre de contenedores.
- Analizar la importancia de las normativas y regulaciones que fomenten la gestión ecológica en las empresas del sector del transporte.
- Proponer, con base en la literatura revisada, las mejores soluciones que permitan reducir el impacto ambiental y social asociado al uso de alternativas ecológicas para la generación de energía eléctrica, como opción al uso de combustibles fósiles.

2. Análisis del contexto y estado del arte

2.1. Análisis del contexto

En esta sección se presenta, por una parte, el análisis del contexto global en materia de emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero, haciendo énfasis en la contribución del transporte de carga por carretera. Por otra parte, se describen las principales regulaciones aplicables al control de las emisiones en diferentes entornos, como la Unión Europea (UE), Estados Unidos (EEUU) o Latinoamérica.

Además, se presenta una breve descripción de los principales acuerdos internacionales formulados para la búsqueda de la estabilización y reducción de las emisiones y del incremento de la temperatura terrestre: el Protocolo de Kioto y el Acuerdo de París.

2.1.1. Los indicadores de emisiones globales

Se revisaron diversos estudios aplicados a nivel global o a un entorno nacional particular, para analizar la contribución del sector del transporte y, concretamente, del transporte de mercancías por carretera, al total de emisiones de dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno (NO_x) y otros gases de efecto invernadero que contribuyen al cambio climático e incrementan el calentamiento global.

En un estudio desarrollado por Fuglestvedt et al. (2008), para estimar el crecimiento de las emisiones asociadas al transporte desde 1875, se determinó que el sector del transporte por carretera y el sector de la aviación han tenido un rápido crecimiento desde las primeras décadas del siglo XX, teniendo el transporte por carretera el crecimiento más importante en este periodo. Por otra parte, se evidencia una disminución de los aportes a las emisiones generados por el transporte ferroviario a partir de la segunda mitad del siglo XX, gracias a la implementación del ferrocarril eléctrico.

Se ha determinado que, en Europa, el sector del transporte contribuye con hasta un 40 % de las emisiones de NO_x hasta el año 2005 (Vestreng, et al., 2009). Los autores identifican diferentes periodos de tiempo, reflejando que se manifiesta una disminución en las emisiones a raíz de la implantación de políticas y regulaciones que limitan la contaminación o gravan el consumo de combustible. Algunas de estas regulaciones aplicadas en Europa se explican con más detalle en la sección 2.1.2.

Según una investigación realizada en India en el año 2000 (Singh, et al., 2008), el transporte terrestre por carretera abarcaba aproximadamente el 80 % del tráfico de pasajeros y el 60 % del tráfico de carga en el país ((Ministry of Finance, 2000) citado por (Singh, et al., 2008)). Además, según el Banco Mundial (2002), el sector del transporte por carretera en este país presentó un crecimiento del 12 % para el tráfico de pasajeros y del 8 % para el tráfico de carga (Singh, et al., 2008).

Esto ha generado, en primer lugar, un incremento notable en el número de vehículos. Por otra parte, también se traduce en un aumento del volumen de combustible consumido. Este crecimiento, y la falta de implementación de otras alternativas, han generado que, entre los años 1980 y 2000, India haya tenido un incremento anual del 7% en las emisiones de CO₂ respecto a los valores de cada año previo.

Singh et al. (2008), concluyen su estudio expresando que “es importante que se elabore un inventario de las emisiones para el sector del transporte por carretera, con el fin de diseñar e implementar tecnologías adecuadas y opciones regulatorias, para tomar medidas de mitigación apropiadas”.

De acuerdo con Sims et al. (2014), en el año 2010 se produjeron 7,0 gigatoneladas de CO₂ equivalente, asociadas de forma directa a la emisión de gases de efecto invernadero en el sector del transporte, repartidas como se muestra en la Figura 1 (consultar la Tabla 16 en el Anexo A), en la que se incluyen 0,1 gigatoneladas de CO₂ equivalente, como contribución indirecta.

En el año 2014, el sector del transporte fue responsable del 23 % de las emisiones totales de CO₂, y el transporte por carretera contribuyó con un 87 % sobre este porcentaje ((International Energy Agency, 2016) citado en (Santos, 2017)).

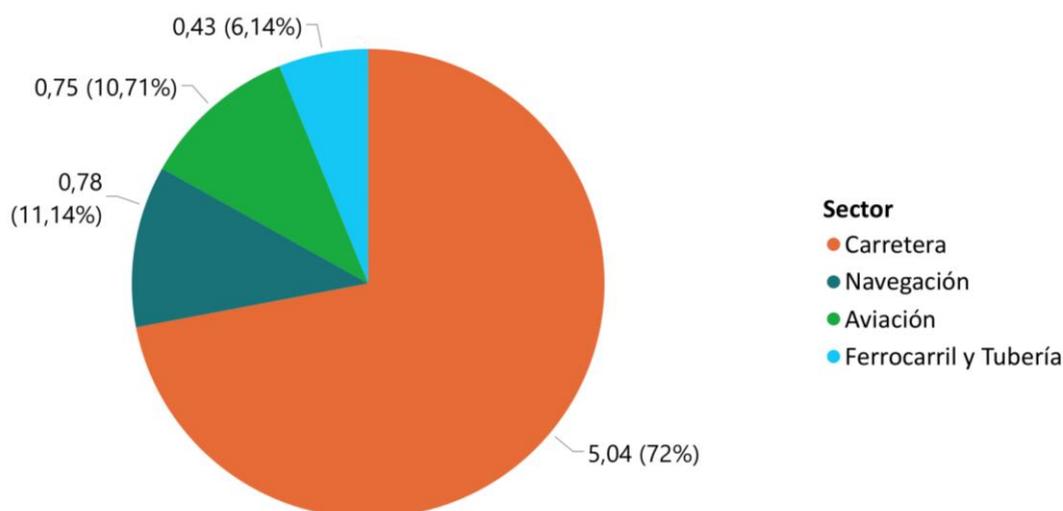


Figura 1. Distribución de las emisiones asociadas al transporte por sector.

Unidades: gigatoneladas de CO₂ equivalente.

Elaboración propia basada en Sims et al. (2014)

En el entorno latinoamericano, la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), publicó las estadísticas más importantes del entorno latinoamericano, incluyendo estadísticas ambientales, como la variación de la temperatura media anual (ver Figura 2), calculada a partir de la temperatura media mensual (ver la Tabla 17 en el Anexo A). Por otra parte, el Banco Mundial (2016) indica que la generación de CO₂ per cápita en el año 2016, en los países de América Latina y el Caribe fue, en promedio, de 3,675 toneladas por habitante, como se muestra en la Figura 3 (datos en la Tabla 18 del Anexo A).

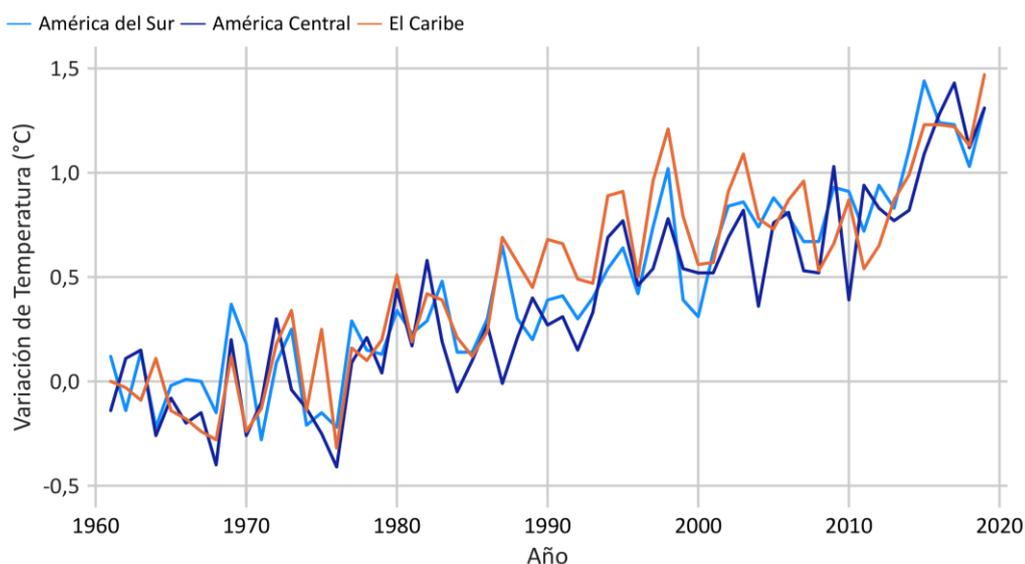


Figura 2. Incremento de la temperatura media anual por región.

Elaboración propia con base en datos de la CEPAL (2021)

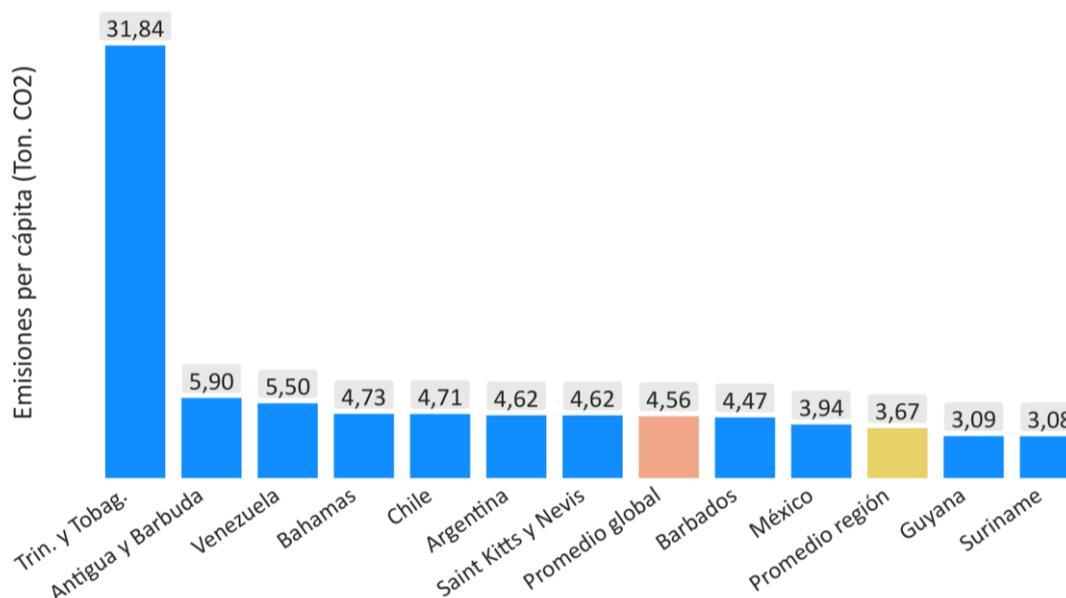


Figura 3. Distribución de las emisiones de CO₂ en Latinoamérica.

Elaboración propia con base en datos del Banco Mundial (2016)

Ante el contexto presentado, se plantea como clave la identificación de los desafíos más importantes, y la necesidad de implementar modelos predictivos que permitan generar escenarios y situaciones distintas, para dar una visión de futuro en la gestión de las emisiones.

De acuerdo con Santos (2017), los dos principales problemas a los que se enfrenta el sector del transporte en el proceso de la reducción de las emisiones son: “la ausencia de acuerdos globales, legales y comprometedores; y el coste relativamente elevado de vehículos, energía y tecnologías limpias”.

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático ha conseguido que se formulen acuerdos globales, como el Protocolo de Kioto o el Acuerdo de París; los cuales, sin embargo, son iniciativas limitadas a la aceptación de los gobiernos, que no siempre es favorable (Santos, 2017).

En un estudio desarrollado por Matthias et al. (2020), se presentan tres escenarios para estimar el contexto de emisiones a 2040 en Alemania: un escenario de referencia, que continúa con las tendencias actuales, introduciendo pequeñas mejoras tecnológicas; un escenario liberal, basado en la lógica del libre mercado evitando un exceso de regulaciones; y un escenario de cambio regulado, promoción del transporte público y fomento del desarrollo de tecnologías limpias.

Como resultado del estudio, los autores concluyen que en el escenario regulado se podría generar 32 % menos emisiones de NO_x y 13 % menos emisiones de material particulado que en el escenario de libre mercado (Matthias, et al., 2020). De ahí la importancia de promover los acuerdos internacionales y las regulaciones regionales y nacionales para el control de emisiones.

A nivel global, Takeshita (2011), realiza un estudio predictivo de las emisiones de gases de efecto invernadero hasta año 2050, a partir de un modelo basado en las regulaciones que se implementarán en países en vías de desarrollo, en el esfuerzo global de reducción de emisiones de CO₂ y en estimaciones de costes.

Se determinó que, si los países en vías de desarrollo incorporan la misma exigencia en regulaciones que los países desarrollados, se evidenciará una reducción en algunos gases de efecto invernadero como los óxidos de azufre (SO_x) o los óxidos de nitrógeno (Takeshita, 2011).

2.1.2. Regulaciones aplicables a la gestión ecológica del transporte

En esta sección se describen brevemente las principales regulaciones referentes al control de emisiones, implementadas en la Unión Europea y en los Estados Unidos. Además, se resume la situación general regulatoria del entorno latinoamericano.

2.1.2.1. Regulaciones propuestas en la Unión Europea y Estados Unidos.

La Unión Europea, en su reglamento 2019/631 del año 2019, establece las normas referentes a las emisiones de CO₂ para vehículos ligeros nuevos; buscando, de este modo, fomentar el desarrollo y la comercialización de vehículos que permitan alcanzar las metas propuestas en el Acuerdo de París del año 2015.

Se propone, entre otras cosas, alcanzar una reducción de hasta el 40 % de los gases de efecto invernadero para el 2030, respecto a los valores del año 1990. Además, para 2030, se buscará una reducción del 30 % en las emisiones, con respecto a los valores de 2005. Por otra parte, se hace énfasis en la promoción de las energías renovables y alternativas a los combustibles fósiles (Parlamento Europeo, 2019).

Por otra parte, el reglamento 2019/1242 del año 2019, aplicable a la reducción de las emisiones de CO₂ para vehículos pesados nuevos, intenta también promover las nuevas tecnologías para la reducción de emisiones a largo plazo. Para este reglamento, se aplican las

mismas metas de reducción que en el reglamento aplicable a vehículos ligeros. Se propone el uso de combustibles de bajo nivel de emisiones y la evaluación periódica a los fabricantes para revisar el cumplimiento de los objetivos (Parlamento Europeo, 2019).

Por otra parte, en los Estados Unidos existe, desde 1963, la Ley del Aire Limpio (*Clean Air Act*), que regula, entre otras cosas, los estándares de emisiones que se implementan en el país. “Bajo la Ley de Aire Limpio, la Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental - EPA) regula las emisiones de contaminantes de fuentes móviles y estacionarias” (United States Environmental Protection Agency, 2020).

Además, la Ley del Aire Limpio promueve la investigación y el desarrollo de nuevas alternativas tecnológicas, tanto para los vehículos y sus motores, como para los combustibles (United States Environmental Protection Agency, 1990) (United States Environmental Protection Agency, 2007).

2.1.2.2. Regulaciones aplicadas en América Latina y el Caribe.

De acuerdo con Herrán (2012), en Latinoamérica “la mayor parte de los países todavía no cuenta con políticas o regulaciones nacionales” referentes al control, mitigación y reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Además, según Bárcena et al. (2020), en los países de Latinoamérica es “insuficiente intentar reducir el consumo de gasolina únicamente por medio del mecanismo de los precios”, reflejando una necesidad de “complementar de manera coherente este mecanismo con regulaciones” (pág. 68).

Algunos países de Latinoamérica han optado por la creación de impuestos verdes o ecológicos aplicables a los automóviles, los combustibles o las emisiones industriales. Entre estos, están Chile (García Bernal, 2018) o Ecuador (Alcívar Valencia, 2016). Además, Chile se destaca por promover la gestión ambiental concreta y a partir de iniciativas locales desde el nivel de los municipios hasta la regulación nacional (Ministerio del Medio Ambiente, 2011).

Se destaca también el proceso regulatorio implementado en Costa Rica que, en el 2016, emitió mediante decreto presidencial un reglamento para el control de las emisiones de los vehículos, promoviendo el uso de tecnologías de reducción de emisiones, y regulando el nivel de emisiones de los nuevos vehículos que entren al país (Presidencia de la República, 2016).

2.1.3. Principales acuerdos internacionales para la reducción de emisiones

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático ha trabajado desde 1992 en la promoción de acuerdos y políticas para el manejo del cambio climático por parte de los países miembros de la Organización de las Naciones Unidas. A raíz de este trabajo, se redactó el Protocolo de Kioto en 1997; y el Acuerdo de París, en 2015.

El Protocolo de Kioto fue el primer resultado de los esfuerzos de la convención; aprobado en 1997, entró en vigencia en 2005 (Organización de las Naciones Unidas, 2021). El protocolo buscó comprometer a las naciones más industrializadas a limitar y reducir la emisión de gases de efecto invernadero en al menos un 5 % respecto a los niveles de 1990, en un período de tiempo entre 2008 y 2012 (Organización de las Naciones Unidas, 1998).

Más recientemente, el Acuerdo de París, aprobado en 2015, refleja los esfuerzos y propuestas para la reducción de las emisiones y el control del incremento de la temperatura global. Concretamente, se propone mantener el incremento de la temperatura por debajo de 2 °C y, de ser posible, por debajo de 1,5 °C.

El acuerdo compromete a la mayor parte de los países de la ONU en el esfuerzo colectivo (Organización de las Naciones Unidas, 2017). Adicionalmente, se promueve el desarrollo y transferencia de innovación tecnológica orientada a conseguir los objetivos propuestos por el acuerdo (United Nations, 2016).

Se analizó la contribución del transporte de mercancías por carretera al total de emisiones de dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) y otros gases de efecto invernadero.

Se revisaron las principales regulaciones referentes al control de emisiones, implementadas en la Unión Europea, los Estados Unidos y Latinoamérica, así como el Protocolo de Kioto y el Acuerdo de París. Los diferentes acuerdos y regulaciones proponen objetivos concretos y ambiciosos, con el fin de frenar, regular y disminuir el cambio climático generado por las emisiones del sector del transporte.

Se evidenció que, en Estados Unidos y Europa, existe un avance significativo en materia de regulaciones; mientras que, en otras regiones, como América Latina, no se encuentran regulaciones vinculantes, a pesar de la imposición de diferentes impuestos ecológicos y restricciones a la importación de vehículos.

2.2. Estado del arte

En este apartado se muestran las soluciones tecnológicas más destacadas hasta la fecha para la reducción de emisiones contaminantes, tanto en materia de vehículos como de combustibles. Además, se realiza una revisión de diferentes estudios y alternativas de gestión eficiente del transporte.

2.2.1. Estudios de evaluación del desempeño de la gestión ecológica

A continuación, se presenta una recopilación de diferentes estudios realizados para innovar en el aspecto ecológico de la cadena logística. Se presentan diferentes propuestas, tendencias y evaluación del impacto.

Chi y Stone (2005) destacan la importancia de la planificación de las rutas del transporte para un mejor control de las emisiones generadas. Proponen un modelo de planificación vial, en el que no sólo se consideren las rutas que generan un menor impacto ecológico, sino que se diseñe la infraestructura vial, incorporando elementos capaces de absorber las emisiones generadas en la misma.

De acuerdo con el estudio desarrollado por Hervani et al. (2005), dado el carácter multidisciplinar y global de las cadenas de suministro, puede resultar complicado medir su desempeño, especialmente el relativo a la gestión ecológica. Por eso, proponen un modelo innovador basado en tres pilares: reportes económicos de la empresa, control interno para una mejor administración y análisis interno, que lleva a la mejor continua.

Además, los autores promueven una gestión verde a través de toda la cadena de suministro: compras, materiales, producción, distribución, ventas, marketing y devoluciones. Y mencionan que la gestión ecológica de la cadena de suministro en su conjunto se entiende como la unión de la gestión individual de cada uno de los eslabones independientes (Hervani, Helms, & Sarkis, 2005).

Srivastava (2007) realiza una compilación de diferentes estudios y trabajos enfocados a la gestión verde de la cadena de suministro. Identifica que la mayor parte de los mismos se relaciona con la gestión de la calidad, las operaciones y la tecnología. Además, propone la integración de los otros aspectos de la cadena, y menciona la posibilidad de oportunidades en la operación de la logística inversa.

En un trabajo desarrollado por Diabat y Govindan (2011), se proponen los pasos para la implementación de una cadena de suministro verde: “identificar los costes, determinar las oportunidades, calcular los beneficios e implementar y controlar”.

Además, se identifican múltiples aspectos clave para la construcción de la logística verde, entre éstos: el diseño de la cadena de suministro, certificaciones de la empresa y de sus proveedores, la gestión de la calidad en los procesos, la logística inversa y las iniciativas de colaboración ambiental con los proveedores y los clientes (Diabat & Govindan, 2011).

En un estudio realizado por Zhu et al. (2012), los autores proponen una gestión de la cadena de suministro con dos bases principales: el aumento de la eficiencia y la sostenibilidad del modelo de producción, y un proceso de innovación con énfasis en la comunicación. Este proceso, además, se compone de cinco pasos: conocimiento, persuasión, toma de decisión, adopción y confirmación ((Rogers, 1995) citado en (Zhu, Sarkis, & Lai, 2012)).

Green et al. (2012), mencionan los procesos más importantes que deben ser integrados en la gestión ecológica, añadiendo a los anteriormente mencionados por Hervani et al. (2005), la gestión de los sistemas de la información de la cadena logística. Algunas de las prácticas descritas en el estudio son las compras con criterios ecológicos, colaboración con los clientes y el diseño enfocado a la ecología (Green, Zelbst, Meacham, & Bhadauria, 2012).

En un estudio de revisión realizado por Fahimnia et al. (2015), se menciona la necesidad de globalizar los esfuerzos y estudios orientados al desarrollo de cadenas de suministro ecológicas, incluyendo diversidad de regiones y entornos económicos dispares. Además, se menciona la importancia de un trabajo conjunto entre la industria y los entes reguladores, para conseguir una mayor aplicabilidad de las regulaciones.

Tseng et al. (2019) identifican en un estudio la oportunidad de aumentar la conciencia ambiental entre todos los participantes de la cadena de suministro de una empresa, fomentando el control y la reducción del impacto en cada una de las operaciones logísticas para, de esta manera, incrementar el rendimiento global de la cadena de suministro ecológica de la organización.

2.2.2. Soluciones tecnológicas para una transformación verde

En esta sección se realiza una revisión del desarrollo tecnológico enfocado a la reducción de emisiones. Se distinguen soluciones aplicadas a los vehículos, al combustible o al procesamiento de los gases de escape, y también soluciones enfocadas al uso de las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) y de modelos de gestión para mejorar el desempeño del transporte, especialmente en el entorno urbano.

2.2.2.1. Soluciones aplicadas a los vehículos y al combustible.

A través del tiempo, se han desarrollado diferentes tecnologías orientadas a reducir el consumo de combustible o las emisiones generadas por vehículos con motores de combustión interna. Entre éstas se distinguen: reducción del peso del vehículo, uso de catalizadores en el escape, investigación en combustibles y el desarrollo de vehículos híbridos o eléctricos.

La investigación en tecnología de materiales ha permitido la obtención de materiales y aleaciones más ligeras y, a su vez, más resistentes. Además, el uso de herramientas de diseño asistido por computadora (*Computer Aided Design - CAD*) contribuye al diseño de estructuras más eficientes. Menciona Lutsey (2010), que la reducción de masa de un vehículo en un 30 % puede generar una disminución en la generación de CO₂ de entre 18 % y 24 %.

Desde hace varias décadas, se han implementado catalizadores para el control de las emisiones. Éstos transforman químicamente las emisiones más contaminantes de un motor de combustión interna en emisiones menos nocivas para la salud humana y el medio ambiente. Kummer (1980), menciona que las regulaciones dictadas en los Estados Unidos a partir de la creación de la Ley del Aire Limpio obligaron a los fabricantes a obtener unos estándares de nivel de emisiones. Por esto, se desarrollaron en esa época catalizadores para la reducción de los óxidos de nitrógeno, especialmente del monóxido de nitrógeno (NO).

Años más tarde, Masuda et al. (1996), propusieron el uso de catalizadores de compuestos con base de plata (Ag), demostrando su viabilidad para la reducción y eliminación de NO_x a diferentes temperaturas de operación del motor. Por otra parte, Brandt et al. (2002), estudian los efectos del uso de un catalizador de tres vías para la conversión de monóxido de carbono (CO), hidrocarburos y NO_x en gases menos peligrosos. Los autores diseñan un sistema de control para la optimización del funcionamiento de estos elementos.

Bosteels y Searles (2002) realizan una revisión del uso de catalizadores que incorporan platino (Pt), surgidos a raíz de las regulaciones impuestas en la Unión Europea para el control de emisiones. Además, compilan en su estudio las tecnologías más importantes usadas para la reducción de las emisiones, tanto en vehículos a gasolina como en vehículos diésel. Shan et al. (2015) desarrollaron un catalizador de alta eficiencia para la reducción de emisiones de óxidos de nitrógeno para vehículos diésel, que les permitió alcanzar los niveles exigidos por las regulaciones europeas.

A raíz de esta recopilación de avances, se evidencia que la implementación de regulaciones cada vez más exigentes fomenta el desarrollo de nuevas tecnologías, para adaptarse a los estándares dictados por las normas.

Romm (2006) realiza una revisión de los avances obtenidos en el tema de vehículos y medios de propulsión alternativos. Se realiza una revisión de los vehículos eléctricos, vehículos híbridos, vehículos que usan un combustible de carbono neutro (metanol, etanol), o un combustible bajo en emisiones (gas natural o mezcla de gasolina y un combustible neutro).

En este estudio se identifican varios desafíos para el desarrollo de estas tecnologías: el alto coste inicial de los vehículos, su autonomía limitada, un posible coste elevado del combustible, y la instalación de una red de abastecimiento eficiente (Romm, 2006).

Por otra parte, Berggren y Magnusson (2012) mencionan que los vehículos con motores de combustión interna están teniendo tales mejoras en los últimos años, que se acercan a un nivel de eficiencia cercano al que proponen los vehículos alternativos, en cuestión de la cantidad de emisiones generadas. De este modo, se obtiene una competencia entre empresas y también entre tecnologías, que beneficia al mercado con nuevos avances, variedad de opciones y mejores precios.

Huisingh et al. (2015) mencionan que el sector de la logística y el transporte presenta un alto potencial para la reducción de emisiones; en parte debido a su alta contribución a las mismas, y en parte también a la posibilidad de implementar alternativas, como el transporte intermodal o el uso de transportes más limpios en la cadena de suministro.

En los últimos años, los vehículos híbridos, que usan una propulsión eléctrica y un motor de combustión interna, se han convertido en una alternativa importante para obtener mejoras ambientales, especialmente en las ciudades (Maggeto & van Mierlo, 2000). Además, según

Gallagher y Muehlegger (2011), en los Estados Unidos se han formulado diferentes iniciativas para fomentar la adquisición de vehículos con tecnología híbrida con respecto a los vehículos a gasolina, como exenciones de impuestos, reducción de tasas, o incremento en los precios del combustible.

Los autores encontraron que los principales incentivos que afectaban al comportamiento de los compradores eran la reducción de impuestos a los vehículos híbridos, y el incremento en los precios de la gasolina (Gallagher & Muehlegger, 2011).

En la década pasada, se ha observado un desarrollo creciente de la investigación y las tecnologías concernientes a los vehículos eléctricos. De acuerdo con Larminie y Lowry (2012), algunas ventajas de estas tecnologías son: el uso eficiente y el ahorro de la energía, la reducción de la contaminación y las emisiones, y la reducción de la dependencia del petróleo y otros combustibles fósiles.

En opinión de Hannan et al. (2014), el desarrollo de la tecnología aplicada a los vehículos híbridos y los vehículos eléctricos se encuentra en auge, debido a la volatilidad de los precios del petróleo o la necesidad de eficiencia energética y de reducción de emisiones. Por otra parte, los autores identifican también varios desafíos, como la necesidad de fuentes de energía limpias, la capacidad de almacenamiento y la potencia de los sistemas, entre otros.

2.2.2.2. Uso de las TIC para la mejora de los sistemas de gestión y la innovación tecnológica.

Se han realizado diferentes estudios que proponen modelos de gestión para la optimización de los procesos logísticos o la reducción del impacto ambiental.

Gómez et al. (2016), proponen un algoritmo de gestión para una ruta de transporte que, aplicado a una empresa real para su validación, permitió una reducción de tiempo de transporte de 73,5 horas al mes, y un ahorro de emisiones del 11,70 % respecto a la ruta no optimizada. En el estudio, los autores hacen énfasis en la importancia de la integración de los sistemas de la empresa como el *Transport Management System* (TMS), el *Warehouse Management System* (WMS) o dispositivos *Global Positioning System* (GPS) para obtener mejores resultados.

En esta misma línea, Navarra y van der Molen (2014), proponen el uso de sistemas georreferenciados para obtener ventajas en la planificación y el diseño urbano, con el

consiguiente beneficio que se genera para el transporte y la logística en las ciudades. Así, es posible alcanzar una mayor eficiencia energética, y una mejora al impacto climático.

En un estudio de caso desarrollado en China, se propone un modelo de gestión, unido a un algoritmo de *machine learning*, aplicado a veintidós ciudades ubicadas a través del cinturón económico del río Yangtzé. Se propone la optimización del transporte urbano y la implementación de un sistema inteligente de transporte para la mejora de la gestión de las operaciones (Lu & Liu, 2018).

La importancia del uso de herramientas de planificación de rutas se ve reflejada en un estudio de Sbihi y Eglese (2011), en el que se proponen diferentes soluciones a un problema de optimización de tráfico, considerando variables como la hora del viaje o el tipo de mercancía. Se concluye en este estudio que los modelos de gestión del transporte deben incorporar variables ambientales que, generalmente, no son consideradas, para incrementar el ahorro de combustible.

Además, Cerna et al. (2019), proponen un modelo para optimizar el funcionamiento de los vehículos híbridos, enfocado en la reducción de emisiones de CO₂ y la carga eficiente de sus baterías. Se busca implementar un sistema de control en el vehículo que le permita utilizar de forma óptima el motor eléctrico y el motor de combustión interna, dependiendo del recorrido y de las variables del entorno.

El estudio del contexto y de la literatura permitió revisar los desarrollos más importantes en temas regulatorios y tecnológicos, aplicados a la gestión y regulación de las emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente en lo que respecta a la contribución de las flotas de transporte. Se verificó que los países más desarrollados tienen un avance regulatorio y tecnológico muy superior a los países en vías de desarrollo.

Se destaca especialmente la importancia de realizar una gestión ecológica integral de todos los procesos de la cadena de suministro. Además, el desarrollo de la tecnología de los vehículos híbridos y eléctricos, y el uso de las TIC, proporcionan a las empresas mejores herramientas para gestionar adecuadamente el impacto ambiental de sus operaciones logísticas.

3. Marco conceptual

3.1. Costes asociados a la logística del transporte de carga por carretera

En este apartado del trabajo, se describen los costes más importantes asociados a la operación logística de un vehículo portacontenedores por carretera. Es conveniente hacer una distinción entre los costes que no dependen del tipo de vehículo (motor de combustión interna o motor eléctrico) y los costes que sí dependen de esta característica.

El *Observatorio de Costes del Transporte de Mercancías por Carretera*, desarrollado por el Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana de España (2021), proporciona una guía completa para el cálculo de costes asociados al transporte de mercancías por carretera, en función del tipo de vehículo. En concreto, se distinguen las siguientes variables:

- Amortización: es la distribución de los costes del vehículo a lo largo de su vida útil, y se calcula como:

$$A = \frac{C - R - N}{v} \quad (1)$$

Donde A es el coste anual de amortización, C es el valor del equipo, R es el valor del vehículo al final de su vida útil v , y N es el valor de los neumáticos.

- Financiación: por lo general, los vehículos se compran mediante un préstamo que deberá ser pagado a plazos durante la vida útil del equipo. El valor a pagar anualmente por la financiación del vehículo es:

$$F = \frac{\left(n \cdot \frac{P \cdot i \cdot j}{j-1}\right) - P}{v} \quad (2)$$

Donde F es el coste anual de la financiación, P es el valor del préstamo solicitado, i es la tasa de interés que se maneja, n es el período de pago del préstamo y la variable j se calcula como $(1 + i)^n$.

- Personal de conducción: hace referencia a la inversión en el salario anual del conductor del vehículo, sin contar dietas y otras prestaciones.
- Seguros del vehículo: la empresa deberá cubrir anualmente los costes del seguro del vehículo.

- Costes fiscales: además, se deberán pagar impuestos por la posesión del equipo, tomando en consideración impuestos ecológicos, si es el caso.
- Combustible: se deberá considerar el coste del combustible del vehículo, ya que incorpora un motor de combustión interna:

$$C = p_c \cdot c \cdot k \quad (3)$$

Donde C es el coste anual en combustible, p_c es el precio del combustible, c es el consumo del vehículo y k son los kilómetros recorridos.

De acuerdo con lo expresado por el *Observatorio de Costes* (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2021), el impuesto sobre hidrocarburos existente en España está contemplado en el coste del combustible, y no se considera en la sección de costes fiscales.

- Disolución de urea: mediante procesos catalizadores que usan compuestos basados en la urea, es posible reducir el nivel de emisiones de NO_x en los vehículos diésel. Es por eso que se incluye el coste de los aditivos de urea en el *Observatorio de Costes*.
- Neumáticos: tienen una duración media, y deben ser cambiados al final de su vida útil. Su coste anual se calcula como:

$$N = \frac{p_n \cdot n \cdot k}{d} \quad (4)$$

Donde N es el coste anual de los neumáticos, p_n es el precio de un neumático, n es el número de neumáticos del vehículo, k es la cantidad anual de kilómetros recorridos y d es la vida útil de los neumáticos usados.

- Mantenimiento: el vehículo debe ser sometido a mantenimiento cada cierta cantidad de kilómetros recorridos:

$$M = m \cdot k \quad (5)$$

Donde M es el coste anual de mantenimiento y m es el valor promedio por kilómetro del mantenimiento.

- Reparaciones: unido al mantenimiento corriente, durante la operación del vehículo surgirán también reparaciones e imprevistos, que deberán ser calculadas:

$$R = r \cdot k \quad (6)$$

Donde R es el coste anual de las reparaciones y r es el valor promedio por kilómetro de las reparaciones.

- Dietas del personal de conducción: incluyen todos los gastos de viaje, alojamiento y alimentación durante las jornadas de trabajo del conductor.
- Peajes: se deberá contemplar también un valor anual por concepto de peajes durante los recorridos del vehículo.
- Costes indirectos: se añade finalmente un monto anual de costes indirectos asociados con la operación de transporte.

Es importante considerar que los costes anteriormente mencionados aplican para vehículos con motor de combustión interna y fueron tomados en su totalidad del *Observatorio de Costes del Transporte de Mercancías por Carretera* (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2021). Para vehículos eléctricos, existirán las siguientes variaciones:

- Costes fiscales: los vehículos eléctricos están exentos del pago de impuestos especiales al combustible fósil o a las emisiones de CO₂. Además, dependiendo del país, podrán acceder a reducciones de impuesto o incentivos para el uso de dichos vehículos.
- Combustible: un vehículo eléctrico no generará gastos asociados al uso de combustibles fósiles. Sin embargo, es conveniente calcular el coste asociado al consumo de electricidad del vehículo:

$$E = e \cdot k \cdot p_e \quad (7)$$

Donde E es el coste anual de la energía del vehículo, e es el consumo promedio kilométrico de energía, k es el número anual de kilómetros recorridos y p_e es el precio unitario promedio de la energía eléctrica.

- Disolución de urea: un vehículo eléctrico no genera gastos en disolución de urea, ya que no necesita controlar las emisiones de NO_x.
- Costes indirectos: los costes indirectos de un vehículo eléctrico podrán variar ligeramente con respecto a los de un vehículo con motor de combustión interna.

A partir de los costes presentados en esta sección, se realiza en la sección 5.3 el cálculo de los costes asociados a la operación de dos vehículos diésel y dos vehículos eléctricos, por un año.

3.2. Cálculo de la huella de carbono

De acuerdo con la organización internacional *The Nature Conservancy* (2021), se define como huella de carbono “a la cantidad total de gases de efecto invernadero, incluido el dióxido de carbono y el metano, que se generan por la acción humana”.

Durante la operación de un vehículo propulsado por un motor de combustible fósil, se generan gases de efecto invernadero, como resultado de la combustión en el motor. Por otra parte, la operación de un vehículo eléctrico no genera gases de efecto invernadero de forma directa, pero la generación de energía eléctrica necesaria para la propulsión del vehículo puede incluir el uso de combustibles fósiles.

En esta sección se describen brevemente las herramientas informáticas y las referencias bibliográficas que se usarán en el desarrollo del estudio para estimar el impacto ecológico de la operación del transporte; tanto las emisiones de CO₂ generadas por los vehículos de combustible fósil, como las emisiones producidas durante el proceso de generación de la energía eléctrica para vehículos que funcionen con motor eléctrico.

3.2.1. Calculadora usada para los vehículos de combustible fósil

Se consideró una calculadora de la huella de carbono para vehículos de combustible fósil, disponible en commercialfleet.org (2021), que permite calcular las emisiones de CO₂ generadas por vehículos de combustible diésel. Se seleccionó esta herramienta por su flexibilidad de uso, dado que presenta diferentes alternativas de cálculo: a partir de la cantidad de combustible consumida, o a partir de la distancia recorrida y del consumo medio del vehículo. Según esta misma fuente, es posible afirmar que 1 litro de combustible diésel genera alrededor de 2,62 kg de CO₂.

Por otra parte, la organización Carbon Footprint Ltd. (2021), del Reino Unido, dispone de una herramienta que permite calcular la huella de carbono de un vehículo en función de los kilómetros anuales recorridos y del consumo medio de combustible.

3.2.2. Valores propuestos para los vehículos eléctricos

Para los vehículos eléctricos, cuya contribución a la huella de carbono está asociada a la generación de energía eléctrica, se encontraron diferentes estimaciones del impacto en la huella de carbono que se produce cuando la electricidad es generada por energías no

renovables (carbón o gas natural), en lugar de energías renovables: hidroeléctrica, solar, eólica, geotérmica, entre otras.

Según la EPA, se estimó una generación promedio de 0,463 kg de CO₂ por cada kWh de energía eléctrica producida, durante el año 2016 (United States Environmental Protection Agency, 2018).

Además, para 2019, la agencia encargada de la administración de la información referente a la energía en los Estados Unidos, estimó una generación de 0,417 kg de CO₂ por kWh de energía eléctrica producido en el país. Se menciona también que las tres principales fuentes de generación de energía son el gas natural, el carbón y el petróleo (U.S. Energy Information Administration, 2019).

De acuerdo con el Consejo Internacional para el Transporte Limpio (Pike, 2012), se calcula que las emisiones asociadas a la generación de energía eléctrica, en Reino Unido, tuvieron un valor promedio de 0,372 kg de CO₂ por cada kWh de energía generada en 2020. Para el año 2030, si se continúa con el proceso de búsqueda de la eficiencia energética e implementación de fuentes de energía renovables, se estima una disminución en el valor promedio en las emisiones, hasta 0,209 kg de CO₂ por cada kWh de electricidad. Por otra parte, se espera que, a 2050, estos valores se hayan reducido todavía más, a raíz de la implementación masiva de fuentes de energía limpias, disminuyendo hasta un valor promedio estimado de 0,023 kg de CO₂ por kWh.

Se obtuvo un valor promedio de emisiones por generación de electricidad, para la Unión Europea, de 0,296 kg CO₂/kWh, según datos del año 2016, presentados por la Agencia Europea del Ambiente (European Environment Agency, 2020). Por otra parte, la misma Agencia calcula un valor estimado de 0,275 kg CO₂/kWh en el año 2019, y presenta una proyección estimada máxima de 0,097 kg CO₂/kWh, para el año 2030 (European Environment Agency, 2020).

Por último, para el caso concreto de España, la Agencia Europea del Ambiente calculó un factor de emisiones de 0,207 kg CO₂/kWh en el año 2019, lo que implica una reducción del 33 %, respecto a los valores del año previo (European Environment Agency, 2020).

Con estos factores estimados, se realizará en la sección 6.2 y en la sección 6.3.5 el cálculo de las emisiones de dióxido de carbono asociadas a la operación logística de dos vehículos diésel y dos vehículos eléctricos, para un año y la proyección a largo plazo.

Usando el *Observatorio de Costes del Transporte de Mercancías por Carretera*, elaborado por el Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana de España (2021), se analizarán los costes asociados a la operación logística de vehículos portacontenedores por carretera, tanto los que no dependen del tipo de vehículo (motor de combustión interna o motor eléctrico) como los que sí dependen de ello.

Por otra parte, por medio de las calculadoras de huella de carbono disponibles en commercialfleet.org (2021) y Carbon Footprint Ltd. (2021); y siguiendo a la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (2018), la Agencia de Administración de Información de la Energía de los Estados Unidos (2019), la Agencia del Ambiente de la Unión Europea (2020) y Pike (2012), se estimará el impacto ecológico de la operación del transporte: emisiones de CO₂ generadas por los vehículos de combustible fósil y emisiones producidas durante el proceso de generación de la energía eléctrica para vehículos eléctricos.

4. Metodología

4.1. Descripción del proceso metodológico

Para el desarrollo de este proyecto, se propone una metodología dividida en tres fases:

- Búsqueda y recopilación de la información: se plantea el proyecto y se recopila la información contextual y teórica necesaria para su desarrollo.
- Planteamiento de la metodología de solución: se presentan los cálculos y procesos de mejora a la situación problema.
- Validación de la propuesta: se aplica a un problema hipotético y se analizan los resultados obtenidos.

4.2. Cronograma de actividades

Se elaboró un diagrama de Gantt (ver Figura 4) como cronograma para la planificación de los procesos a seguir durante el desarrollo del proyecto.

Fase del Proyecto	Actividad	Semana															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Fase 1: Búsqueda y recopilación de la información	Definición del problema	■	■	■													
	Estudio del contexto		■	■	■	■											
	Recopilación de información			■	■	■	■										
Fase 2: Planteamiento y desarrollo de la metodología	Definición de objetivos					■	■	■									
	Desarrollo matemático					■	■	■	■								
	Construcción de la solución							■	■	■							
Fase 3: Validación del desarrollo propuesto	Planteamiento de la situación									■	■	■	■				
	Aplicación de la metodología									■	■	■	■	■			
	Análisis de resultados												■	■	■	■	
	Validación de resultados													■	■	■	
Redacción del documento final	Conclusiones de la validación														■	■	
	Conclusiones del estudio																■
	Redacción del documento final																■

Figura 4. Diagrama de Gantt para el desarrollo del proyecto.

(Elaboración propia)

4.3. Diagrama de flujo

En la Figura 5 se presenta la metodología propuesta para la elaboración del proyecto, contemplando todas las partes de cada una de las fases del proceso.

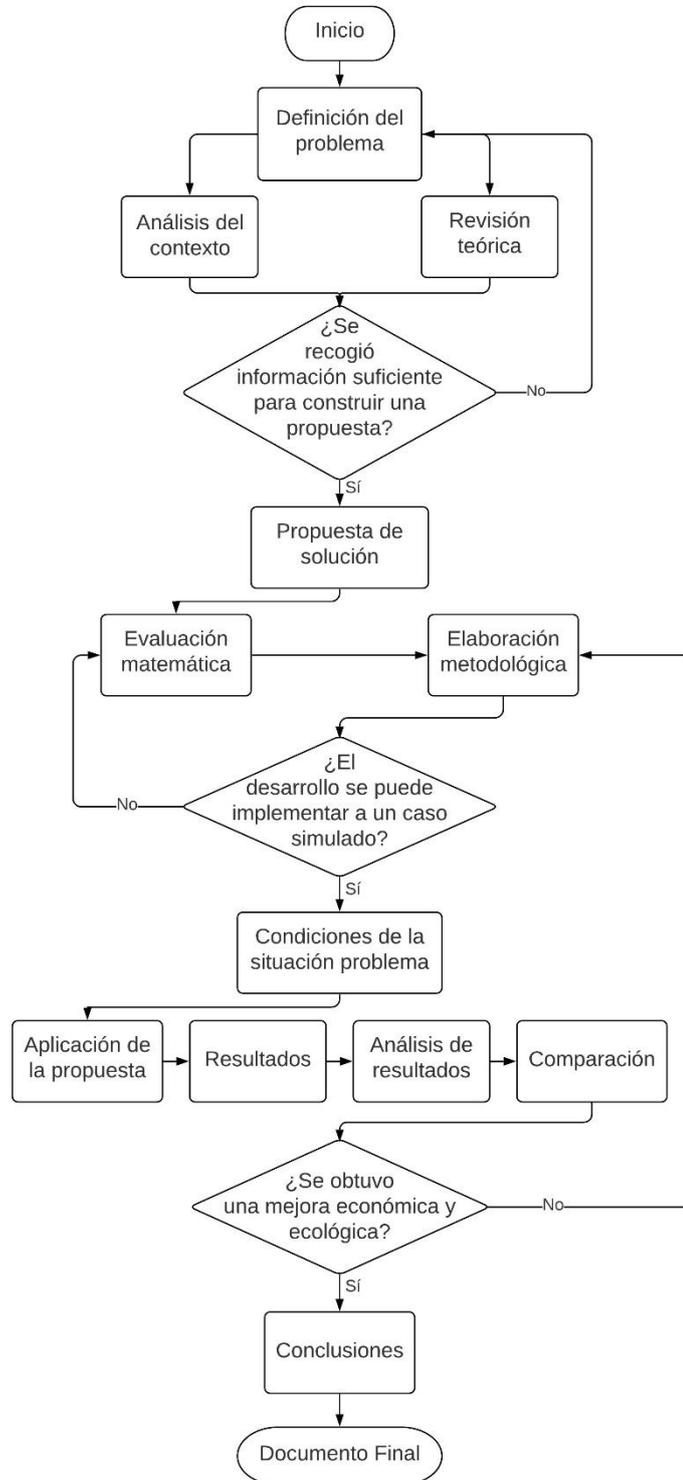


Figura 5. Diagrama de flujo propuesto para la metodología.
(Elaboración propia)

5. Desarrollo

En esta sección se desarrolla el proceso metodológico para proponer una solución que permita gestionar la transición ecológica, aplicable a una empresa de transporte terrestre de mercancías por carretera.

Se describe en primer lugar una propuesta, incluyendo una serie de procesos y de resultados esperados. A continuación, se presentan las condiciones experimentales para un caso de estudio hipotético, para realizar la validación de la solución propuesta.

Es importante tener en cuenta que esta validación no se hará sobre una empresa real, al no disponer del acceso a datos concretos. Por eso, se propondrán condiciones con referencia en la bibliografía, que permiten dar una aproximación inicial de validación.

Además, se complementará lo descrito en la sección 3.1, haciendo una distinción de los costes asociados a la operación de una empresa de transporte terrestre, tomando en consideración el medio de propulsión del vehículo.

5.1. Propuesta metodológica de solución

Se formula en este apartado una propuesta metodológica propia, para ayudar a una empresa de transporte terrestre de mercancías por carretera a gestionar en forma adecuada la flota del transporte, obteniendo beneficios económicos y ecológicos, como resultado de esta gestión y transformación.

5.1.1. Descripción de la propuesta

Se propone una solución consistente en cinco pasos principales, que permitirá a una empresa de transporte identificar, gestionar y evaluar su desempeño ecológico actual, y determinar una solución de gestión buscando la reducción de los costes del transporte y del impacto ecológico generado por la operación.

- Evaluación del entorno económico y político: la empresa debe conocer si se reúnen las condiciones económicas y legislativas para implementar un proceso de transformación ecológica de la flota del transporte. Es importante considerar aspectos como las regulaciones vigentes y las diferentes cargas impositivas, para identificar los riesgos, desafíos y oportunidades.

- **Análisis de la flota:** se debe analizar el entorno particular de la empresa, en lo referente a la flota de transporte que maneja en el momento actual, evaluando aspectos como el recorrido de los vehículos y características propias de los vehículos de la empresa, como su consumo de combustible o la vida útil.

En esta etapa, se calculan los costes y las emisiones asociadas a la operación anual de la flota de la empresa.

- **Búsqueda de una solución:** se seleccionan alternativas de vehículos eléctricos, para proponerlas como reemplazo a los vehículos actuales de la empresa. Para estas opciones, se deben evaluar sus prestaciones, especialmente en lo referente al coste de la operación y a las emisiones asociadas.
- **Implementación de la gestión:** se propone un escenario para estimar los efectos de la propuesta a largo plazo. Se estudia qué alternativa es la que genera el menor coste y la menor cantidad de emisiones.
- **Comparación y decisión:** con base en los costes, las emisiones, la rentabilidad a largo plazo y otros criterios que se consideren relevantes, se debe decidir si se implementa la alternativa buscada, si se realiza la búsqueda de una nueva alternativa, o si no se reúnen las condiciones para implementar un proceso de gestión ecológica y resulta más favorable continuar con los procesos que se llevan a cabo en la actualidad.

5.1.1.1. Instrumentos de evaluación, validación y métricas propuestas

Los principales indicadores que permitirán determinar la validación adecuada de la implementación de la propuesta son los costes asociados a la operación del transporte y las emisiones generadas por los vehículos analizados.

Por otra parte, se presenta en la sección 6.4 una matriz multicriterio, que permite evaluar otros aspectos que pueden ser considerados importantes, según los criterios que defina la empresa para la evaluación. Las métricas más importantes que se analizarán son los costes de operación y las emisiones de dióxido de carbono, por un año y por un período de ocho años.

5.1.1.2. Resultados esperados

Se espera que la metodología propuesta en este estudio permita a una empresa de transporte de mercancías por carretera obtener reducciones tanto en los costes de operación de la flota, como en las emisiones asociadas a la operación del transporte.

5.1.2. Diagrama de procesos

De acuerdo con lo presentado en la sección previa, se elaboró un diagrama de flujo, mostrado en la Figura 6 y la Figura 7, que contempla los procesos propuestos para llevar a cabo la metodología descrita, aplicable a la gestión de la transición ecológica de una empresa de transporte terrestre de mercancías por carretera.

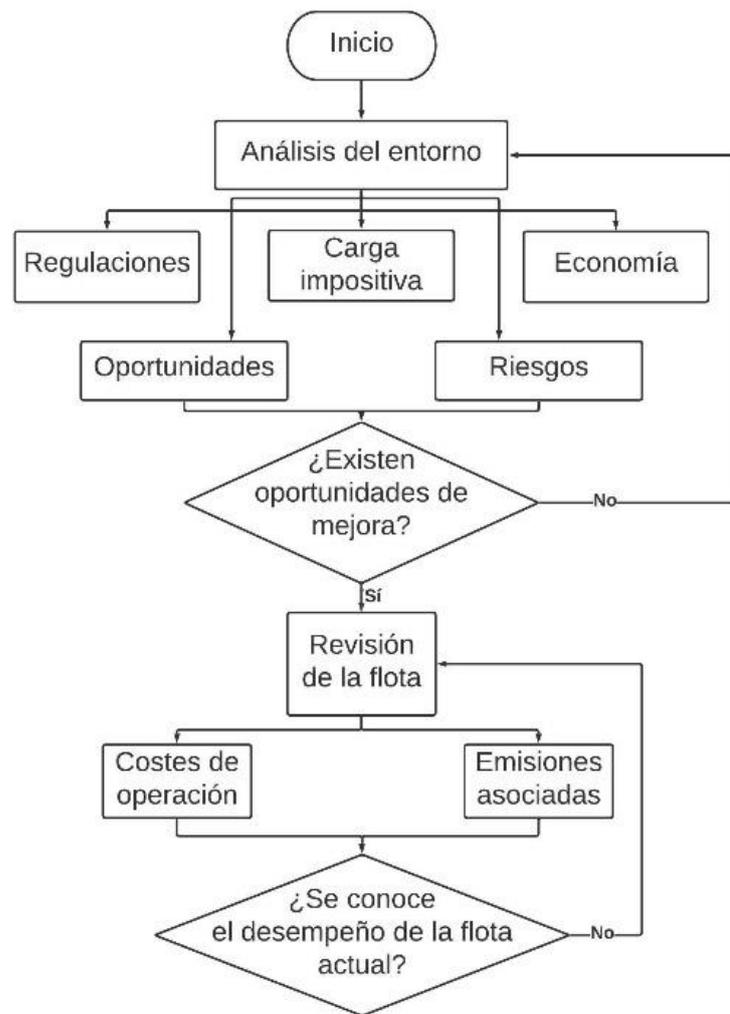


Figura 6. Desarrollo de metodología de solución, fases 1 y 2.
(Elaboración propia)

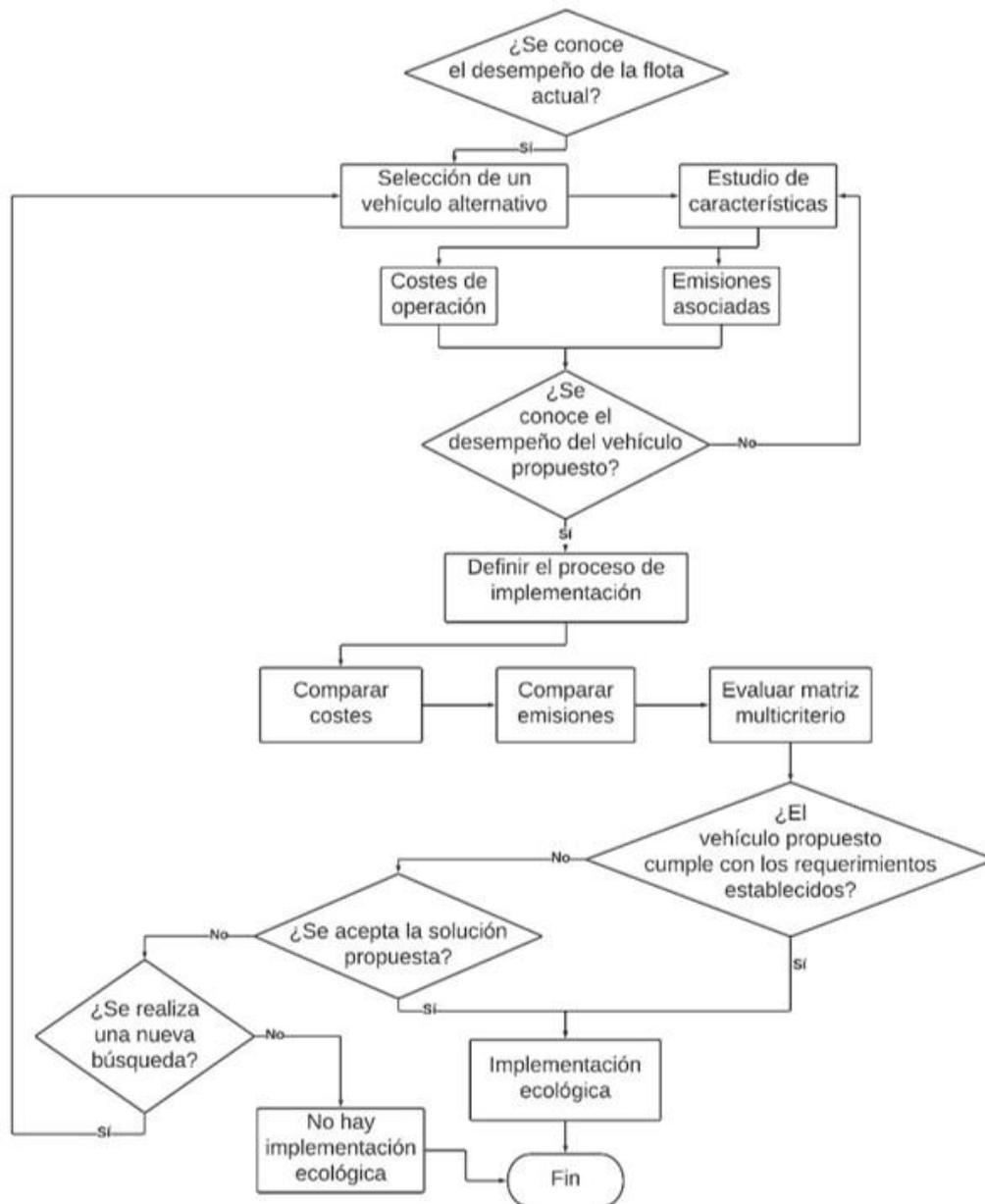


Figura 7. Desarrollo de metodología de solución, fases 3, 4 y 5.

(Elaboración propia)

Se propone una **metodología de desarrollo propio**, para la gestión de una empresa de transporte terrestre de mercancías por carretera, consistente en cinco pasos clave: evaluación del entorno económico y político, análisis de la flota, búsqueda de una solución, implementación de la gestión y comparación y decisión.

Esta metodología permitiría a una empresa de transporte realizar una evaluación de su entorno, identificar oportunidades de mejora, evaluar diferentes propuestas y establecer las mejores opciones para reducir los costes del transporte y el impacto ecológico generado por la operación de su flota de transporte.

5.2. Caso de estudio para validación

Se demostrará el funcionamiento de la metodología de solución propuesta empleando un caso supuesto, a falta de datos reales correspondientes a un entorno empresarial concreto.

Por eso, se propone en esta sección una serie de datos, condiciones e hipótesis, provenientes de diferentes fuentes de información, para respaldar una situación supuesta que permita construir un proceso de validación, y demostrar la conveniencia de la metodología en empresas reales.

En la sección 7.2.2, se establece como propuesta para futuros estudios, la posibilidad de aplicar esta misma metodología descrita con condiciones tomadas de un entorno del cual se cuente con datos históricos.

5.2.1. Condiciones de la simulación para validación

A continuación, se presentan las condiciones más importantes que describen el entorno escogido para elaborar la validación de la propuesta. Se distinguen en este estudio tres condiciones generales:

- Las condiciones del entorno en el que se desarrolla la actividad económica de la empresa; unidas a las condiciones de uso, que aplican tanto al vehículo de combustible fósil como al vehículo eléctrico.
- Las características de los vehículos para el transporte de mercancías por carretera, propulsados con un motor de combustible fósil (diésel), seleccionados como modelo para los cálculos correspondientes a la validación.
- Las características de los vehículos propulsados por un motor eléctrico, escogidos como alternativa ecológica para las actividades de transporte que realiza la empresa en sus operaciones logísticas.

5.2.1.1. Condiciones relativas al entorno general

Se asume, en primer lugar, que la empresa realiza sus operaciones y tiene su localización en un país europeo (España), con el fin de que tengan validez las estimaciones realizadas por el *Observatorio de Costes del Transporte de Mercancías por Carretera* (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2021).

Se asume que la empresa realiza recorridos por todo el territorio de la Unión Europea; y, de acuerdo con el *Observatorio de Costes*, se considera un recorrido anual de 100.000 km; de los cuales, 85.000 se realizan con carga y 15.000, sin carga (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2021). Este valor se considera aplicable para todos los modelos de vehículos propuestos.

La unidad monetaria a utilizar será el euro (€).

5.2.1.2. Selección de los vehículos propulsados por un motor de combustión interna

Se propone el uso de la cabeza tractora Freightliner Cascadia® (Figura 8) y la cabeza tractora Kenworth T680 Next Gen® (Figura 9), como modelos para obtener los datos aplicables a la operación de diferentes vehículos propulsados con un motor de combustión interna que emplea combustible fósil. Se seleccionaron estos vehículos, por ser los modelos que presentaban una mayor cantidad de información disponible en las fuentes de referencia.



Figura 8. Freightliner Cascadia®.

Imagen obtenida de (Freightliner Trucks, s.f.)

Disponible en: <https://freightliner.com/images/select-sleeper-cab.png>



Figura 9. Kenworth T680 Next Gen®.

Imagen obtenida de (Kenworth Truck Company, 2021)

Disponible en: <https://www.kenworth.com/media/ci5ivls0/t680-ng-listing.png>

De acuerdo con la página web del fabricante del Freightliner Cascadia® (Freightliner Trucks, s.f.), el vehículo tiene una potencia de hasta 605 HP, con un promedio de 478 HP. El portal de venta de camiones Truck Locator (2021), de Reino Unido, estima el coste del vehículo en aproximadamente 130.000 €, sin incluir la plataforma semirremolque.

El Freightliner Cascadia® puede llevar hasta dos tanques de 100 galones de combustible cada uno, lo que equivale a una capacidad total de aproximadamente 750 litros de combustible. Además, se estima el rendimiento del combustible en 9,31 millas por galón (Bulk Transporter, 2012), lo que equivale a aproximadamente 25,3 litros por cada 100 km.

Por otra parte, de acuerdo con la Kenworth Truck Company (2021), el Kenworth T680 Next Gen® presenta una potencia de entre 405 y 510 HP, con un promedio de 450 HP (Kenworth Sales Company, 2020).

Además, el vehículo puede llevar hasta 150 galones (aprox. 570 litros) de combustible (Kenworth Sales Company, 2020), con un alcance promedio de 9 millas por galón (Automotive World, 2016), equivalentes a 26,1 litros por cada 100 kilómetros recorridos.

Según el portal de comercialización de camiones Truck Paper, de los Estados Unidos, el Kenworth T680 Next Gen® tiene un coste aproximado de 123.294 €.

De acuerdo con Barnes y Langworthy (2003), los costes conjuntos de mantenimiento y reparaciones para un camión convencional se pueden estimar en 10,5 centavos por milla, lo que equivale aproximadamente a 0,054 €/km. Se aplica este valor para ambos modelos de vehículo diésel.

En la Tabla 1 se resumen las principales características detalladas para los vehículos propuestos como modelo.

Tabla 1. Características de los vehículos propulsados con combustible fósil

Característica	Freightliner Cascadia®	Kenworth T680 Next Gen®
Potencia	478 HP	450 HP
Capacidad de combustible	750 litros	570 litros
Alcance	25,3 L/100 km	26,1 L/100 km
Precio estimado	130.000 €	123.294 €
Vida útil	8 años	8 años
Número de neumáticos	10 + 12	10 + 12
Coste de mantenimiento	0,054 €/km	0,054 €/km
Coste de reparaciones		

(Elaboración propia)

5.2.1.3. Selección de los vehículos propulsados por un motor eléctrico

Se propone el uso del camión Tesla Semi® (Figura 10), y del camión Lion Electric eLion8T® (Figura 11), como vehículos modelo para estimar los costes y las emisiones asociadas a la operación de vehículos eléctricos. De igual forma que los vehículos anteriores, estos modelos se seleccionaron también en función de la información disponible para consulta.



Figura 10. Tesla Semi®.

Imagen obtenida de (Tesla, Inc., 2021)

Disponible en:

https://www.tesla.com/tesla_theme/assets/img/_vehicle_redesign/roadster_and_semi/semi/performance.jpg



Figura 11. Lion Electric eLion8T®.

Imagen obtenida de (The Lion Electric Company, s.f.)

Disponible en: <https://pages.thelionelectric.com/wp-content/uploads/2020/08/Lion8-tractor-1300X975.png>

Es importante tener en cuenta que la información presentada a continuación aplica únicamente para la cabeza tractora del vehículo. Para los valores referentes al semirremolque portacontenedores, se referirá al *Observatorio de Costes* del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (2021).

El Tesla Semi® es considerado uno de los camiones más innovadores en la actualidad. Fue presentado en 2017 y cuenta con fecha estimada para el inicio de la producción en serie y la venta en 2021 (Tesla, Inc., 2021).

Según la página web del fabricante (Tesla, Inc., 2021), en la cual se pueden hacer reservas y compras del modelo, se presenta un producto con dos versiones de rango máximo, para la misma capacidad de carga: un rango de 300 millas (aprox. 475 km), o una versión de 500 millas (aprox. 800 km) de rango. Los fabricantes expresan que el vehículo tiene un consumo promedio inferior a 2 kWh/mi o, lo que es igual, aproximadamente 1,25 kWh/km. Además, el vehículo tiene un sistema de cuatro motores eléctricos en el eje posterior.

En Europa, el producto tiene un precio base de 150.000 € en su versión de 475 km de rango, y 180.000 € en la versión con un rango de 800 km. Además, es necesario hacer un adelanto de 20.000 € por concepto de reserva de la compra.

De acuerdo con la compañía fabricante, el sistema eléctrico del Tesla Semi® está garantizado para una vida útil de al menos un millón de millas (Tesla Inc., 2017) (O'Dell, 2019), lo que

equivale a 1,6 millones de kilómetros. Además de las características mencionadas, el vehículo presenta un elevado nivel de confiabilidad, por la ausencia de algunas piezas móviles como la transmisión o el sistema de cambios, que reduce el riesgo de daños. Adicionalmente, el uso de cuatro motores independientes asegura el funcionamiento continuo, incluso con la pérdida o daño de uno o dos motores.

Por otra parte, la empresa garantiza una vida útil de los frenos prácticamente equivalente a la vida útil del vehículo. La energía disipada durante el proceso de frenado, se transforma también en energía eléctrica mediante el uso de generadores. Otro componente importante que se garantiza es el parabrisas, reduciendo el riesgo de daño en el mismo, y evitando así los procesos y costes de mantenimiento relacionados con este aspecto (Tesla Inc., 2017).

Como comparación, se propone el vehículo canadiense Lion Electric eLion8T[®], que fue presentado en 2018, y se encuentra en fase de pre-producción.

De acuerdo con el fabricante, el vehículo presenta un rango de hasta 260 millas, aproximadamente 420 km, y una capacidad de las baterías de hasta 653 kWh. De este modo, es posible calcular que el vehículo tendrá un consumo promedio de 1,55 kWh/km (The Lion Electric Company, s.f.).

El vehículo Lion Electric eLion8T[®] tiene una vida útil estimada de 12 años, y un coste estimado de aproximadamente 240.000 € (Descarries, 2019).

Se sigue también el estudio de Barnes y Langworthy (Barnes & Langworthy, 2003), que proponen un coste estimado de 0,054 €/km, aplicado conjuntamente al mantenimiento y reparaciones de un camión portacontenedores. Resumiendo, en la Tabla 2 se presentan las principales características de los modelos propuestos.

Tabla 2. Características de los vehículos propulsados con motor eléctrico

Característica	Tesla Semi®	Lion Electric eLion8T®
Fecha de lanzamiento	2017	2018
Fecha estimada de inicio de ventas	2021	2021
Rango (2 versiones)	475 km - 800 km	420 km
Consumo	1,25 kWh/km	1,55 kWh/km
Precio base (2 versiones)	150.000 € - 180.000 €	240.000 €
Vida útil	1,6 millones de km	12 años
Número de neumáticos	6 + 12	10 + 12
Coste de mantenimiento	0,054 €/km	0,054 €/km
Coste de reparaciones		

(Elaboración propia)

Para validar la metodología propuesta, se asumen datos, condiciones e hipótesis, que permiten respaldar una situación supuesta para demostrar la conveniencia de la metodología en empresas reales.

Se considera una empresa de transporte por carretera con sede en España y movilidad en el territorio europeo. Como vehículos propulsados con un motor de combustión interna que emplea combustible fósil, se consideran el Freightliner Cascadia® y el Kenworth T680 Next Gen®. Como vehículos eléctricos, se proponen el Tesla Semi® y el Lion Electric eLion8T®.

5.3. Proceso de implementación de la metodología

En esta sección se presentan los cálculos elaborados manualmente o con el apoyo de la herramienta informática Acotram en su versión 3.1.0 (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2018), con datos actualizados a enero de 2021, para determinar los costes más importantes asociados a la operación de los vehículos presentados en la sección 5.2.1.2 y la sección 5.2.1.3, de acuerdo a la teoría descrita en la sección 3.1 de este trabajo.

Se realiza una distinción entre los costes que no dependen del vehículo, y que se asumen como costes fijos independientes de la operación, y los costes que son diferentes para cada uno de los vehículos y dependen de sus características de diseño, coste de venta y del sistema de propulsión que emplean.

5.3.1. Identificación de costes independientes del vehículo

Se distinguen los siguientes costes que afectan la operación del transporte, y que son independientes del tipo de vehículo. Es importante considerar que el cálculo se realiza asumiendo que el vehículo en cuestión recorre 100.000 km anuales, 85.000 km con carga y 15.000 km en vacío.

- Se considera el salario del personal de conducción, que trabaja un promedio de 1.800 horas anuales, repartidas en 225 días. En total, se define que el salario anual para el conductor del camión, incluyendo las deducciones de impuestos y seguridad social, sería de 30.100 €. Este valor no incluye las dietas y bonificaciones necesarias para la actividad del conductor, que se incluirán en otro apartado.
- En lo referente al valor de los seguros que paga anualmente la empresa, se emplea el valor por defecto de Acotram, que es de 5.588,98 €. Este valor asegura: responsabilidad civil del remolque, protección de la mercancía, accidentes, daños al vehículo, defensa jurídica, entre otros. Se excluye del cálculo el valor del seguro por responsabilidad civil aplicable al semirremolque, que se incluirá en la sección 5.3.2.3.
- Se asumen los costes fiscales, por concepto de impuestos, inspección técnica y revisión del tacógrafo, por un valor total de 768,80 €, que es el sugerido por defecto en la aplicación Acotram.

- Como se propone en la sección 5.2.1, siguiendo a Barnes y Langworthy (2003), se considera un valor de mantenimiento y reparaciones de 0,054 €/km aplicable a ambos tipos de vehículos. Por lo tanto, para los 100.000 km anuales recorridos, se obtiene un coste total en reparaciones y mantenimiento de 5.400 €.
- Acotram propone un valor de 34,26 € diarios por concepto de dietas al conductor, durante los 225 días estándar de trabajo al año. Además, el sistema incluye también un valor por bonificaciones a la actividad de 0,058 €/km. En total, la suma de dietas y bonificaciones sería de 12.697,70 € anuales, empleando los valores propuestos por defecto en el programa.
- Se asume un valor de 1.617,77 €, propuesto por defecto en Acotram, para los gastos realizados en peajes, durante el recorrido anual del vehículo.

En la Tabla 3 se presentan los costes obtenidos:

Tabla 3. Estimación de costes anuales independientes del vehículo

Concepto	Valor
Personal de conducción	30.100 €
Seguros	5.588,98 €
Costes fiscales	768,80 €
Mantenimiento y reparaciones	5.400 €
Dietas del conductor	12.697,70 €
Peajes	1.617,77 €
Total	56.173,25 €

Cálculos y estimaciones de costes realizadas en Acotram (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2018)

5.3.2. Aplicación de costes dependientes del vehículo

Se consideran, por otra parte, los costes que dependen directamente del tipo de vehículo, de sus características físicas y de diseño, de su consumo energético, del coste inicial y su vida útil, y del medio de propulsión empleado.

Se mencionan los costes aplicables a las cabezas tractoras que emplean combustible fósil (Freightliner Cascadia® y Kenworth T680 Next Gen®), a las que emplean un motor eléctrico (Tesla Semi® y Lion Electric eLion8T®) y a la plataforma semirremolque portacontenedores, que es común para todos los modelos de cabezas tractoras.

Se realiza esta estimación de costes empleando también la aplicación Acotram (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2018), con actualización de datos al 31 de enero de 2021. Es importante considerar que, en los cálculos realizados en esta sección, no se tomarán en cuenta los diferentes gastos de importación, aduanas e impuestos que puedan surgir en el proceso de compra del vehículo o de sus componentes.

5.3.2.1. Costes aplicables a los vehículos de combustión interna

Se considera el empleo de la siguiente nomenclatura: los costes correspondientes al Freightliner Cascadia® tendrán un subíndice "1", y los costes correspondientes al Kenworth T680 Next Gen® tendrán un subíndice "2".

- El coste de amortización del vehículo se calcula con base en su precio inicial, su valor residual y el período de vida útil, como se expresó en la Ecuación 1. Además, siguiendo el valor sugerido por defecto en Acotram, se calcula el valor residual como un 20 % del valor inicial. Por otra parte, de acuerdo con Acotram, se establece un precio por defecto de 573,97 € a cada uno de los neumáticos nuevos de cada vehículo. Por consiguiente, el valor de la amortización anual sería:

$$A_1 = \frac{C - R - N}{v} = \frac{130.000 - 26.000 - 5.739,70}{8} = 12.282,54 \text{ €}$$

$$A_2 = \frac{C - R - N}{v} = \frac{123.294 - 24.658,80 - 5.739,70}{8} = 11.611,94 \text{ €}$$

- Se propone financiar el 100 % del valor total inicial del vehículo, a cinco años, con una tasa del 4,13 % de interés. Reemplazando en la Ecuación 2, se obtiene el coste de la financiación para cada vehículo:

$$j = (1 + i)^n = (1 + 0,0413)^5 = 1,224276017$$

$$F_1 = \frac{\left(n \cdot \frac{P \cdot i \cdot j}{j-1}\right) - P}{v} = \frac{\left(5 \cdot \frac{130.000 \cdot 0,0413 \cdot 1,224276017}{1,224276017-1}\right) - 130.000}{8} = 2067,66 \text{ €}$$

$$F_2 = \frac{\left(n \cdot \frac{P \cdot i \cdot j}{j-1}\right) - P}{v} = \frac{\left(5 \cdot \frac{123.294 \cdot 0,0413 \cdot 1,224276017}{1,224276017-1}\right) - 123.294}{8} = 1961,00 \text{ €}$$

- Se considera un coste promedio del combustible de 0,8102562 € por litro (sin IVA y aplicando una devolución por gasóleo profesional con fines tributarios), según los valores propuestos al 31 de enero de 2021 por el *Observatorio de Costes del Transporte de Mercancías por Carretera* (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2021).

Teniendo en cuenta el recorrido anual de los vehículos y su consumo promedio de combustible, se calcula mediante la Ecuación 3 el gasto anual de combustible para este modelo:

$$C_1 = p_c \cdot c \cdot k = 0,8102562 \cdot 0,253 \cdot 100.000 = 20.499,48 \text{ €}$$

$$C_2 = p_c \cdot c \cdot k = 0,8102562 \cdot 0,261 \cdot 100.000 = 21.147,69 \text{ €}$$

- El coste de la disolución de urea para el vehículo es de 1.453,87 € por año, según los valores sugeridos por Acotram. Se empleará este valor para los dos vehículos modelo.
- De acuerdo con los datos de Acotram, el coste individual de un neumático se estima en 573,97 € la unidad. Además, se conoce que la duración media será de aproximadamente 150.000 km, por lo que, de acuerdo con la Ecuación 4, el gasto anual en neumáticos se estima, para cada uno de los vehículos, como:

$$N_1 = \frac{p_n \cdot n \cdot k}{d} = \frac{573,97 \cdot 10 \cdot 100.000}{150.000} = 3.826,47 \text{ €}$$

$$N_2 = \frac{p_n \cdot n \cdot k}{d} = \frac{573,97 \cdot 10 \cdot 100.000}{150.000} = 3.826,47 \text{ €}$$

- Se sugiere que los costes indirectos asociados a la operación correspondan a un 6,0 % de los costes directos, que incluyen los calculados en esta sección, y los costes calculados en la Tabla 3.

En la Tabla 4 se presenta un resumen de los costos estimados en esta sección.

Tabla 4. Estimación de costes anuales aplicables a los vehículos de combustión interna

Concepto	Freightliner Cascadia®	Kenworth T680 Next Gen®
Amortización	12.282,54 €	11.611,94 €
Financiación	2.067,66 €	1.961,00 €
Combustible	20.499,48 €	21.147,69 €
Disolución de urea	1.453,87 €	1.453,87 €
Neumáticos	3.826,47 €	3.826,47 €
Costes indirectos	5.778,20 €	5.770,45 €
Total	45.908,22 €	45.771,42 €

Cálculos y estimaciones de costes realizadas en Acotram (Ministerio de Transportes,
Movilidad y Agenda Urbana, 2018)

5.3.2.2. Costes aplicables a los vehículos eléctricos

Se propone emplear el subíndice “3” para los costes asociados al Tesla Semi®, y el subíndice “4” para los costes asociados al Lion Electric eLion8T®.

- Siguiendo el valor por defecto de Acotram, se propone un valor del 20 % del valor inicial como valor residual. Teniendo en cuenta que la vida útil garantizada para el Tesla Semi® es de 1.600.000 kilómetros; y considerando un recorrido anual de 100.000 km, se propone una vida promedio de 12 años para el vehículo en cuestión (considerando otros factores que pudieran acortar la vida útil garantizada, debido a que no existen datos a largo plazo).

Considerando además el valor de los neumáticos nuevos, y usando la Ecuación 1, la amortización anual para cada uno de los vehículos propuestos sería:

$$A_3 = \frac{C - R - N}{v} = \frac{180.000 - 36.000 - 3.443,82}{12} = 11.713,02 \text{ €}$$

$$A_4 = \frac{C - R - N}{v} = \frac{240.000 - 48.000 - 5.739,7}{12} = 15.521,69 \text{ €}$$

- Se calcula el coste de la financiación de los vehículos a cinco años, con el 100 % del valor inicial, a una tasa de interés del 4,13 %, empleando la Ecuación 2:

$$j = (1 + i)^n = (1 + 0,0413)^5 = 1,224276017$$

$$F_3 = \frac{\left(n \cdot \frac{P \cdot i \cdot j}{j-1}\right) - P}{v} = \frac{\left(5 \cdot \frac{180.000 \cdot 0,0413 \cdot 1,224276017}{1,224276017-1}\right) - 180.000}{12} = 1908,61 \text{ €}$$

$$F_4 = \frac{\left(n \cdot \frac{P \cdot i \cdot j}{j-1}\right) - P}{v} = \frac{\left(5 \cdot \frac{240.000 \cdot 0,0413 \cdot 1,224276017}{1,224276017-1}\right) - 240.000}{12} = 2.544,81 \text{ €}$$

- A partir del valor de consumo de energía eléctrica, dado por el fabricante, y estimando el precio de la energía eléctrica en aproximadamente 0,0858 €/kWh, según Sönninchen (2020), se desarrolla la Ecuación 7, para estimar el coste de la energía de los vehículos en un año. El coste de la energía se obtuvo promediando el valor de 27 países de Europa, para un consumo de entre 500 MWh y 2.000 MWh, de acuerdo con los valores presentados en la Tabla 19.

$$E_3 = e \cdot k \cdot p_e = 1,25 \cdot 100.000 \cdot 0,0858 = 10.725,00 \text{ €}$$

$$E_4 = e \cdot k \cdot p_e = 1,55 \cdot 100.000 \cdot 0,0858 = 13.299,00 \text{ €}$$

- Conociendo que el coste unitario de los neumáticos se estima en 573,97 €, y que la vida útil promedio se estima en aproximadamente 150.000 km, empleando la Ecuación 4 se calcula el coste anual de los neumáticos como:

$$N_3 = \frac{p_n \cdot n \cdot k}{d} = \frac{573,97 \cdot 6 \cdot 100.000}{150.000} = 2.295,88 \text{ €}$$

$$N_4 = \frac{p_n \cdot n \cdot k}{d} = \frac{573,97 \cdot 10 \cdot 100.000}{150.000} = 3.826,47 \text{ €}$$

- De acuerdo con la aplicación, se propone que los costes indirectos sean un 6,0 % de los costes calculados para los vehículos, sumados a los costes independientes, presentados en la Tabla 3.

En la Tabla 5 se resumen los costes estimados en esta sección.

Tabla 5. Estimación de costes anuales aplicables a los vehículos eléctricos

Concepto	Tesla Semi®	Lion Electric eLion8T®
Amortización	11.713,02 €	15.521,69 €
Financiación	1.908,61 €	2.544,81 €
Energía eléctrica	10.725,00 €	13.299,00 €
Neumáticos	2.295,88 €	3.826,47 €
Costes indirectos	4.968,95 €	5.481,91 €
Total	31.611,46 €	40.673,88 €

Cálculos y estimaciones de costes realizadas en Acotram (Ministerio de Transportes,
Movilidad y Agenda Urbana, 2018)

5.3.2.3. Costes aplicables al semirremolque portacontenedores

Es importante tener en cuenta que estos costes se pueden aplicar a ambos tipos de vehículos, ya que el semirremolque empleado es el mismo.

- Se calcula el coste de amortización del semirremolque, con base en un coste inicial estimado de 30.000 €, una vida útil de 8 años y un valor residual del 15 % del valor inicial; es decir, 4.500 €.

Manteniendo el precio por defecto para los neumáticos en 573,97 € cada unidad; y, considerando que la plataforma tiene 12 neumáticos, la amortización anual del semirremolque sería de:

$$A = \frac{C - R - N}{v} = \frac{30.000 - 4.500 - 6887,64}{8} = 2.326,54 \text{ €}$$

- La financiación del semirremolque se calcula a cinco años (igual que las cabezas tractoras), y para el 100 % del valor inicial, con un 4,13 % de interés, según la Ecuación 2:

$$j = (1 + i)^n = (1 + 0,0413)^5 = 1,224276017$$

$$F = \frac{\left(n \cdot \frac{P \cdot i \cdot j}{j-1}\right) - P}{v} = \frac{\left(5 \cdot \frac{30.000 \cdot 0,0413 \cdot 1,224276017}{1,224276017-1}\right) - 30.000}{8} = 477,15 \text{ €}$$

- Se incluye en esta sección el valor del seguro por responsabilidad civil, aplicable al semirremolque, de 490,39 €, según propone por defecto Acotram.
- El semirremolque propuesto tendrá un total de 12 neumáticos, con un valor de 573,97 € la unidad, y una vida media de 150.000 km, de acuerdo con los valores de Acotram. El coste anual por este concepto, calculado según la Ecuación 4, será:

$$N = \frac{p_n \cdot n \cdot k}{d} = \frac{573,97 \cdot 12 \cdot 100.000}{150.000} = 4.591,76 \text{ €}$$

- Los costes indirectos aplicables a la operación de la plataforma semirremolque se estimaron en un 6,0 % de los costes directos.

En la Tabla 6 se muestran los costes estimados para el semirremolque seleccionado.

Tabla 6. Estimación de costes anuales aplicables al semirremolque

Concepto	Valor
Amortización	2.326,54 €
Financiación	477,15 €
Seguros	490,39 €
Neumáticos	4.591,76 €
Costes indirectos	473,15 €
Total	8.358,99 €

Cálculos y estimaciones de costes realizadas en Acotram (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2018)

Se determinaron los costes más importantes asociados a la operación de los vehículos:

- Costes independientes del tipo de vehículo: salarios, seguros, costes fiscales, mantenimiento y reparaciones, dietas del conductor y peajes.
- Costes dependientes del tipo de vehículo: amortización, financiación, combustible o energía eléctrica, disolución de urea, neumáticos y otros costes indirectos.

5.4. Desempeño de la alternativa propuesta a largo plazo

En esta sección se propone una estimación de la variación porcentual de los diferentes costes calculados en las secciones previas, para dos entornos económicos: el contexto de España y el promedio de la Unión Europea en su constitución actual (27 países desde 2020).

A partir de esta variación, se calcularán los porcentajes promedio, que serán aplicados en la sección 6.3 para estimar la rentabilidad a largo plazo de la alternativa de solución propuesta.

Por otra parte, se presenta una estimación de las emisiones generadas a largo plazo, a partir de los valores disponibles en diferentes referencias.

5.4.1. Clasificación de los costes según su tipología

Dentro de los diferentes costes de la operación logística, se asumen tres clasificaciones diferentes:

- Costes que no experimentan variación en el tiempo: el coste de amortización y el de financiación permanecen constantes durante la vida útil del vehículo y el período de financiamiento, respectivamente.

En las condiciones del caso propuesto, se considera que el periodo de financiamiento es menor que la vida útil del vehículo.

- Costes a los que aplica la inflación promedio del entorno económico: se asume que el valor de los seguros, el coste de la disolución de urea, los neumáticos, la inversión en mantenimiento y reparaciones y el coste de los peajes, son cifras que varían de acuerdo al valor de la inflación según el entorno económico propuesto.
- Costes que tienen una variación diferente a la inflación promedio: se considera, por otra parte, que el salario y las dietas del personal de conducción, los costes fiscales y el precio del combustible diésel y de la energía eléctrica, experimentan una variación diferente a la de los costes anteriores.

Además, estos costes son los que representan un mayor porcentaje de los costes totales, por lo que su variación afecta en mayor medida a la rentabilidad calculada a largo plazo.

- Se considera, finalmente, que los costes indirectos representan un 6 % sobre el valor de los costes directos.

5.4.2. Evaluación de la variación porcentual en el tiempo

Para los diferentes costes asociados a la operación logística, se calculará el promedio de la variación porcentual de los últimos años, con el fin de estimar la variación a largo plazo y la rentabilidad asociada a la operación. Además, se realiza este cálculo tanto para la variación en un entorno económico particular (España), como para un entorno económico común (Unión Europea).

El análisis de los datos se realizó empleando las herramientas de visualización y análisis de Microsoft Power BI®.

5.4.2.1. Variación de la inflación

Se calculó un valor estimado para la inflación en España de 1,09 %; y un valor para la Unión Europea de 1,33 %. Ambos valores se determinaron a partir del promedio del valor de la inflación de los precios al consumidor, en el período 2009 - 2019, para los datos calculados por el Banco Mundial (2019). La evolución de la inflación se muestra en la Figura 12, construida a partir de los datos presentados en la Tabla 20, Anexo C.

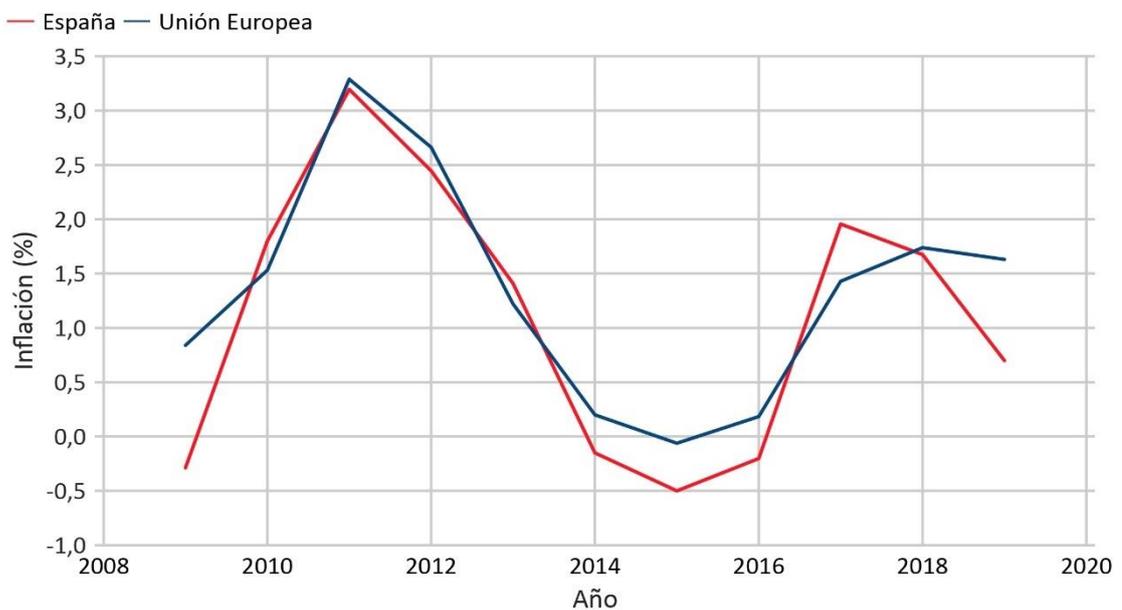


Figura 12. Variación de la inflación.

Elaboración propia con datos del Banco Mundial (2019)

5.4.2.2. Variación de los costes principales

De acuerdo con los datos de la Oficina Europea de Estadística (2021), el salario neto promedio de un trabajador soltero y sin hijos presentó la siguiente variación promedio en el período 2013 - 2020: 0,96 % para España y 1,87 % para el promedio de la Unión Europea.

En la Figura 13 se presenta en forma gráfica la evolución de estos valores y de su variación porcentual anual, a lo largo del período propuesto, según los datos recogidos en la Tabla 21 del Anexo C.

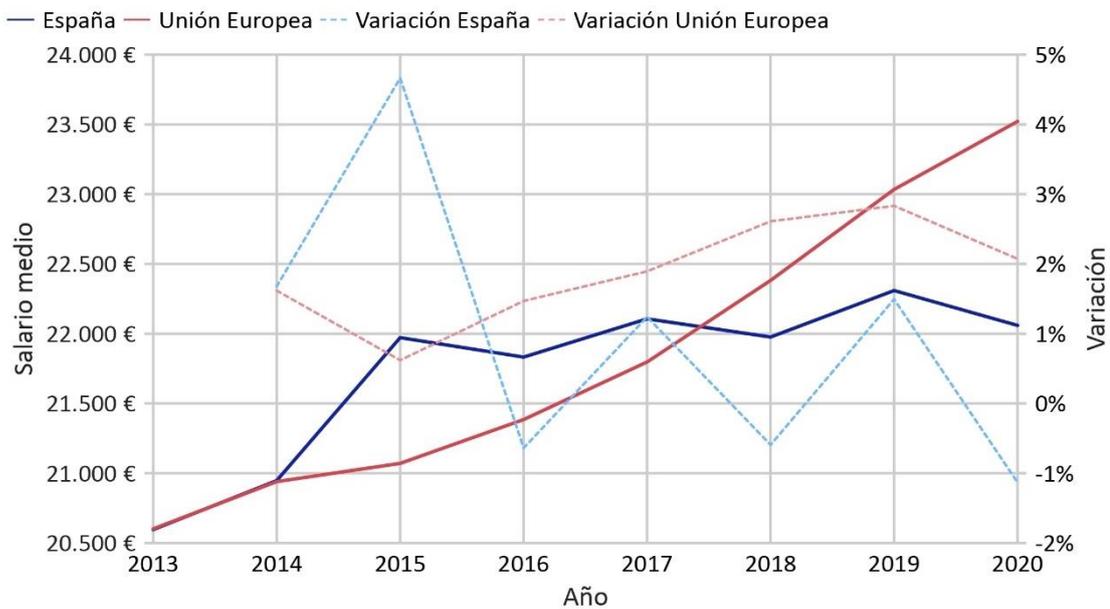


Figura 13. Variación del salario neto promedio.

Elaboración propia con datos de la Comisión Europea (2021)

Dada la dificultad de encontrar información de los costes fiscales aplicables a la operación del transporte de mercancías por carretera, se incluye únicamente la información disponible en el *Observatorio de Costes del Transporte de Mercancías* (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2021), entre 2018 y 2021.

La variación promedio calculada es de 0,51 %, y se asumirá que este valor aplica también para el promedio de la Unión Europea. En la Figura 14 se muestra el valor de los costes fiscales y su variación porcentual, según los datos presentados en la Tabla 22 del Anexo C.

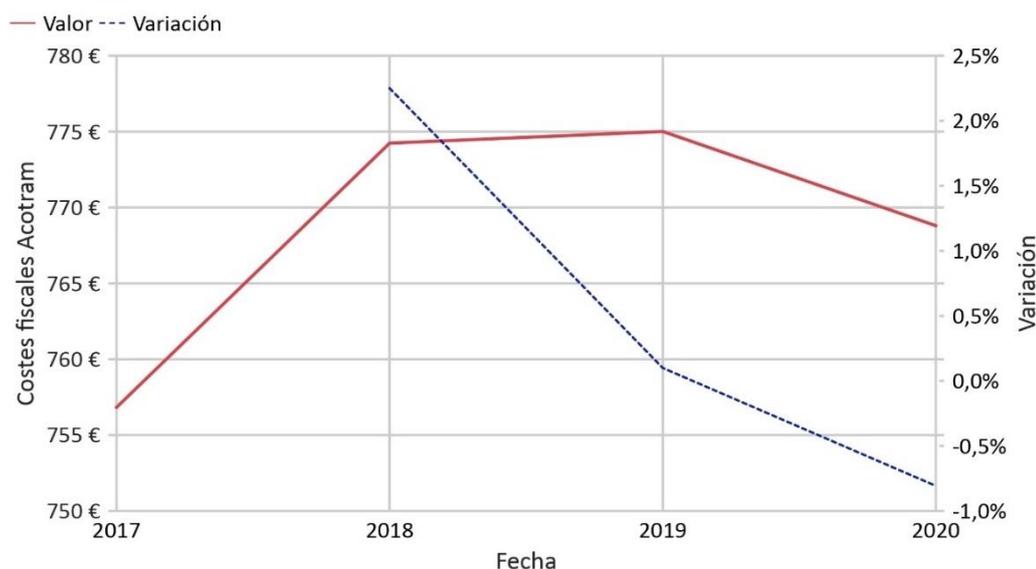


Figura 14. Variación de los costes fiscales.

Elaboración propia con datos del Ministerio de Transportes (2021)

En la Figura 15 se presenta la evolución del coste neto del combustible diésel en España y en la Unión Europea, con una variación promedio de 0,09 % y 0,41 %, respectivamente. Los datos fueron tomados para el período 2010 - 2021, se incluyen en la Tabla 23 (Anexo C), y fueron obtenidos de la Agencia Europea del Ambiente (2021).

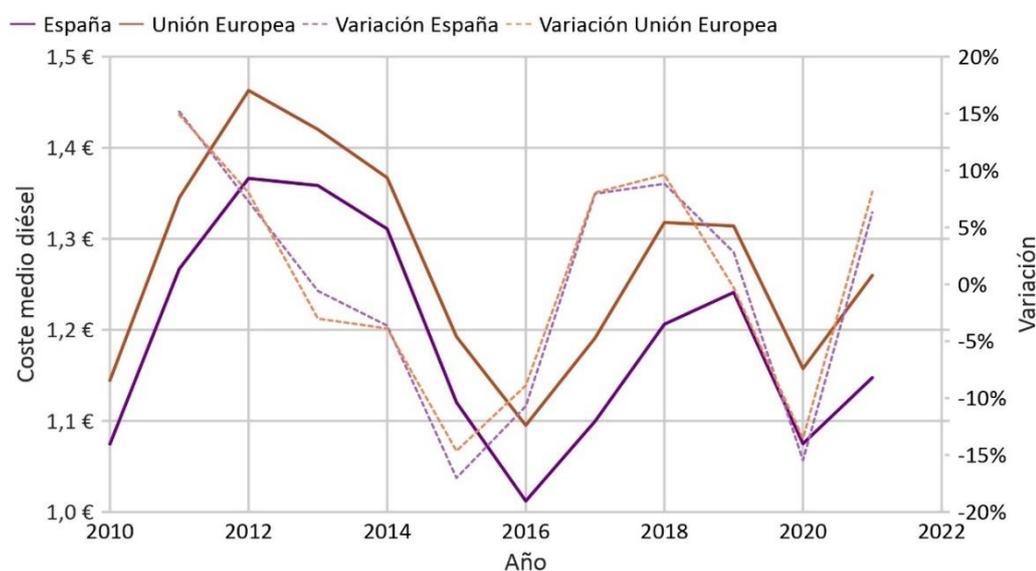


Figura 15. Evolución del precio neto del combustible.

Elaboración propia con datos de la Agencia Europea del Ambiente (2021)

Se calculó también la variación promedio para el precio neto de la energía eléctrica (incluye impuestos y otras tasas), de acuerdo con los valores recogidos por la Oficina Europea de Estadística (2021). Se obtuvo una variación promedio de -3,70 % para España, y de -0,83 % para el conjunto de la Unión Europea. Ambos valores fueron estimados entre 2010 y 2020. La

variación en los costes se muestra en la Figura 16, y los datos se presentan en la Tabla 24, Anexo C.

En la Figura 16 se observa que los precios netos presentan una tendencia a disminuir en los últimos diez años, lo cual es reflejo del esfuerzo que se está realizando para obtener fuentes de energía menos costosas y, al mismo tiempo, más limpias.

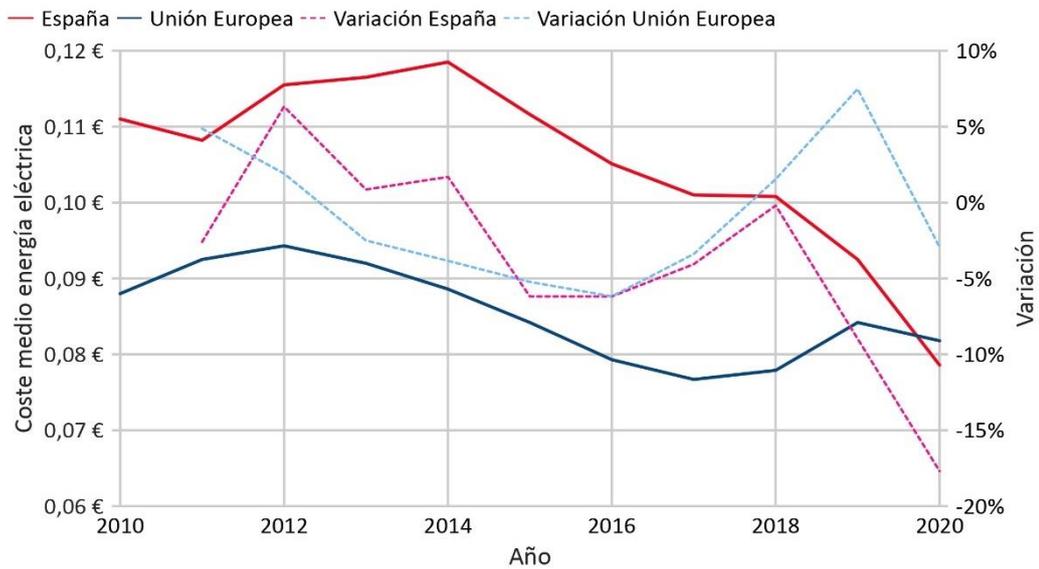


Figura 16. Cambio del precio neto de la energía eléctrica.

Elaboración propia con datos de la Oficina Europea de Estadística (2021)

5.4.2.3. Resumen de los resultados encontrados

En la Tabla 7 se muestra una compilación de los resultados encontrados, tanto para el entorno económico de España, como para las condiciones promedio en la Unión Europea.

Tabla 7. Variación promedio anual de los costes de operación

Variable	Variación promedio anual (%)	
	España	Unión Europea
Inflación	1,09	1,33
Salario neto y dietas	0,96	1,87
Costes fiscales	0,51	0,51
Precio del diésel	0,09	0,41
Coste de la energía eléctrica	-3,70	-0,83

(Elaboración propia)

5.4.3. Estimación de la generación de emisiones

Se describe en esta sección una proyección de los valores de las emisiones derivadas de la generación de energía eléctrica en el entorno español y europeo, hasta el año 2030. Por otra parte, se asume que, a largo plazo, el factor de emisión de combustible diésel permanece constante.

5.4.3.1. Revisión de proyecciones a 2030

De acuerdo con la Agencia Europea del Ambiente (2018), los países pertenecientes a la Unión Europea tienen el compromiso de reducir las emisiones totales de gases de efecto invernadero en al menos un 40 %, respecto a los valores totales del año 1990.

Para conseguir este objetivo, la Comisión Europea propone que el sector de la generación de la energía debe realizar las mayores reducciones en las emisiones, estableciendo un valor de al menos una reducción del 60 %, respecto a los valores del sector en el año 2015 (European Commission, 2020).

La Agencia Internacional de la Energía (2020), propone el uso de energías renovables, particularmente de la energía eólica, para incrementar el porcentaje de energía producida por medio de fuentes limpias, y reducir de este modo las emisiones asociadas a la generación de electricidad.

La Agencia Europea del Ambiente propone una proyección de las emisiones de 0,097 kg de CO₂ por kWh de energía generada para el año 2030 en la Unión Europea, con base en los valores de los años previos, en las regulaciones implementadas y en el avance que llevan los países en la reducción de emisiones (European Environment Agency, 2020).

Por otra parte, conociendo que España tuvo un factor de emisiones de 0,318 kg CO₂/kWh en el año 2015 (European Environment Agency, 2020), y teniendo en cuenta una reducción del 60 %, según propone la Comisión Europea (2020), se proyecta un valor de 0,127 kg CO₂/kWh para el año 2030.

5.4.3.2. Proyección anual de las emisiones

En la Tabla 8 se muestra el resumen de los datos recogidos en las diferentes referencias.

Tabla 8. Proyección de las emisiones a largo plazo

<i>Emisiones en kg CO₂/kWh</i>	1990	2015	2019	2030
España	0,449	0,318	0,207	0,12720
Unión Europea	0,524	0,317	0,275	0,09681

Elaboración propia con base en (European Environment Agency, 2020)

A partir de la información anterior, en la Tabla 25 del Anexo C se presenta la proyección anual de las emisiones de CO₂ por kWh de energía eléctrica generada, para el contexto de España y de la Unión Europea, en el período 2019 - 2030. Estos valores se usarán para estimar el valor acumulado de las emisiones, en la sección 6.3.5.

Se propone una estimación de la variación porcentual de los diferentes costes calculados en las secciones previas. Para los diferentes costes asociados a la operación logística, se calcula el promedio de la variación porcentual de los últimos años, con el fin de estimar la variación a largo plazo y la rentabilidad asociada a la operación.

Se presenta una estimación de las emisiones generadas a largo plazo, a partir de los valores disponibles en diferentes referencias bibliográficas consultadas.

6. Resultados

En esta sección se presentan los costes totales aplicables a la operación logística del transporte de mercancías por carretera, para dos vehículos con motor de combustible fósil y dos vehículos eléctricos, a partir de los costes estimados en la sección anterior. Además, se presentan estimaciones del impacto ambiental considerando las emisiones de dióxido de carbono generadas.

Los resultados calculados se graficaron y analizaron empleando las herramientas de análisis de datos del programa Microsoft Power BI®.

Se encontró, aplicando las condiciones de validación del caso propuesto, que los vehículos propulsados por motor eléctrico tendrían un menor coste anual, comparado con los costes anuales de los vehículos diésel. Por otra parte, los vehículos eléctricos seleccionados generarían menos emisiones de dióxido de carbono asociadas a la operación logística.

Se demostró en este estudio que los vehículos eléctricos constituyen una alternativa más rentable económicamente, para un período de ocho años. Adicionalmente, se demostró también que la opción ecológica lleva asociada una menor generación de emisiones de CO₂, estimadas para el período 2019 - 2030.

Se concluye con el desarrollo de una matriz multicriterio propuesta para facilitar la toma de decisiones de gestión ecológica, a partir de una serie de factores relevantes, y la ponderación que asigne el usuario a cada uno.

Empleando la metodología de cálculo de la matriz multicriterio, fue posible comprobar, empleando el caso propuesto para validación, la viabilidad de las alternativas ecológicas, frente a las alternativas que emplean combustible fósil.

6.1. Costes de la operación logística

A continuación, se presentan los costes totales aplicables a la operación logística de los vehículos propuestos para el desarrollo de la metodología. El coste total se obtiene sumando los costes independientes del tipo de vehículo, los costes dependientes del vehículo y los costes estimados para el semirremolque, que es el mismo en todos los vehículos.

6.1.1. Costes aplicables a los vehículos diésel

A partir de los datos presentados en la Tabla 3, la Tabla 4 y la Tabla 6, se elaboró la Tabla 9, que refleja la estimación de los costes totales aplicables a la operación logística que realizan los vehículos seleccionados, propulsados por un motor de combustión interna.

Para la operación durante 1 año y 100.000 km, se obtuvo un valor total estimado de 110.440,46 € para el Freightliner Cascadia®, y un total de 110.303,66 € para el modelo Kenworth T680 Next Gen®.

Tabla 9. Costes anuales totales para los vehículos de combustión interna

Concepto	Freightliner Cascadia®	Kenworth T680 Next Gen®
Personal de conducción	30.100,00 €	30.100,00 €
Seguros	6.079,37 €	6.079,37 €
Costes fiscales	768,80 €	768,80 €
Mantenimiento y reparaciones	5.400,00 €	5.400,00 €
Dietas del conductor	12.697,70 €	12.697,70 €
Peajes	1.617,77 €	1.617,77 €
Amortización	14.609,08 €	13.938,48 €
Financiación	2.544,81 €	2.438,15 €
Combustible	20.499,48 €	21.147,69 €
Disolución de urea	1.453,87 €	1.453,87 €
Neumáticos	8.418,23 €	8.418,23 €
Costes indirectos	6.251,35 €	6.243,60 €
Total	110.440,46 €	110.303,66 €

Cálculos y estimaciones de costes realizadas en Acotram (Ministerio de Transportes,
Movilidad y Agenda Urbana, 2018)

Además, en la Figura 17 y la Figura 18 se presenta la distribución de los costes totales, de acuerdo a los diferentes conceptos y actividades relacionadas con la operación de los vehículos propuestos.

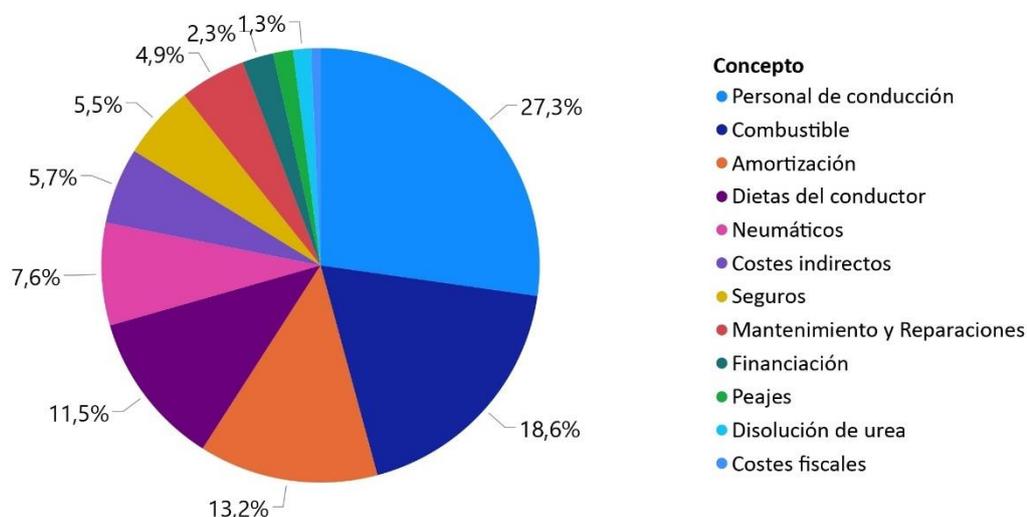


Figura 17. Distribución de costes anuales para el Freightliner Cascadia®.

Elaboración propia con base en la Tabla 9.

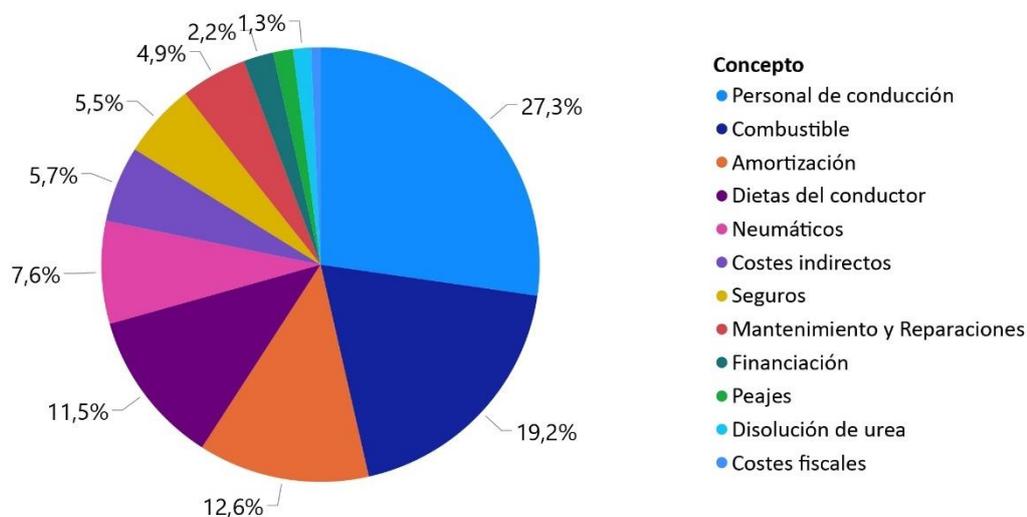


Figura 18. Distribución de costes anuales para el Kenworth T680 Next Gen®.

Elaboración propia con base en la Tabla 9.

Se evidencia que los costes del salario al conductor son los más representativos para la operación, con un porcentaje del 27,3 % en ambos casos. Además, es de gran influencia el gasto en combustible (entre el 18,6 % y el 19,2 % de coste total), el pago que se hace por la amortización del vehículo y la inversión en neumáticos. Estos cinco valores constituyen más del 75 % de los gastos de la operación de cada uno de los dos vehículos diésel seleccionados.

6.1.2. Costes aplicables a los vehículos eléctricos

En la Tabla 10 se presenta la estimación de los costes totales para el vehículo eléctrico seleccionado durante el desarrollo de la metodología propuesta. Los valores se obtuvieron sumando las estimaciones presentadas en la Tabla 3, la Tabla 5 y la Tabla 6.

Considerando 1 año completo de operación, y 100.000 km de recorrido anual, el coste total anual aplicable a la operación del vehículo sería de 96.143,70 € para el Tesla Semi®, y de 105.206,12 € para la cabeza tractora Lion Electric eLion8T®.

Tabla 10. Costes anuales totales para los vehículos eléctricos

Concepto	Tesla Semi®	Lion Electric eLion8T®
Personal de conducción	30.100,00 €	30.100,00 €
Seguros	6.079,37 €	6.079,37 €
Costes fiscales	768,80 €	768,80 €
Mantenimiento y reparaciones	5.400,00 €	5.400,00 €
Dietas del conductor	12.697,70 €	12.697,70 €
Peajes	1.617,77 €	1.617,77 €
Amortización	14.039,56 €	17.848,23 €
Financiación	2.385,76 €	3.021,96 €
Energía Eléctrica	10.725,00 €	13.299,00 €
Neumáticos	6.887,64 €	8.418,23 €
Costes indirectos	5.442,10 €	5.955,06 €
Total	96.143,70 €	105.206,12 €

Cálculos y estimaciones de costes realizadas en Acotram (Ministerio de Transportes,
Movilidad y Agenda Urbana, 2018)

Además, en la Figura 19 y la Figura 20 se muestra la distribución de los costes totales, aplicables a la operación de los vehículos eléctricos propuestos.

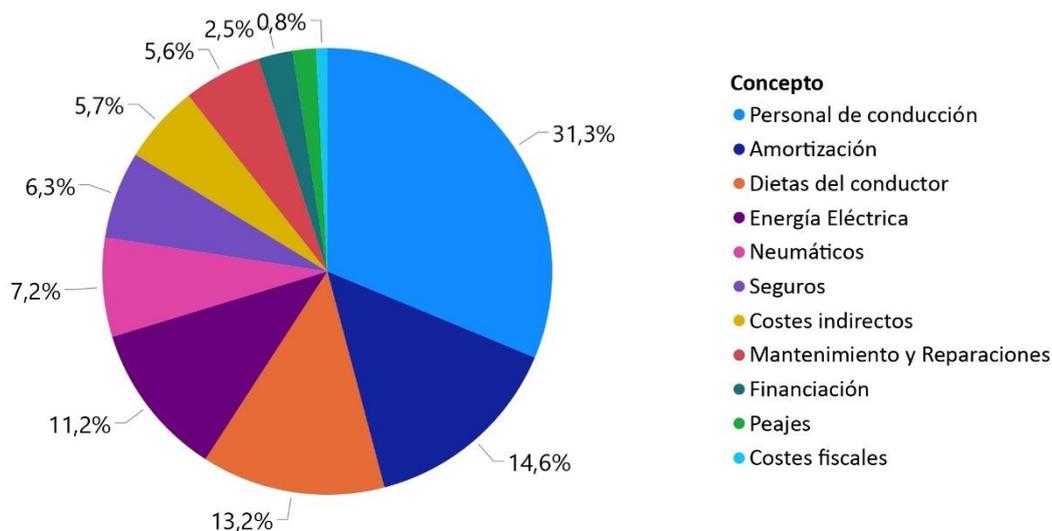


Figura 19. Distribución de costes anuales para el Tesla Semi®.

Elaboración propia con base en la Tabla 10.

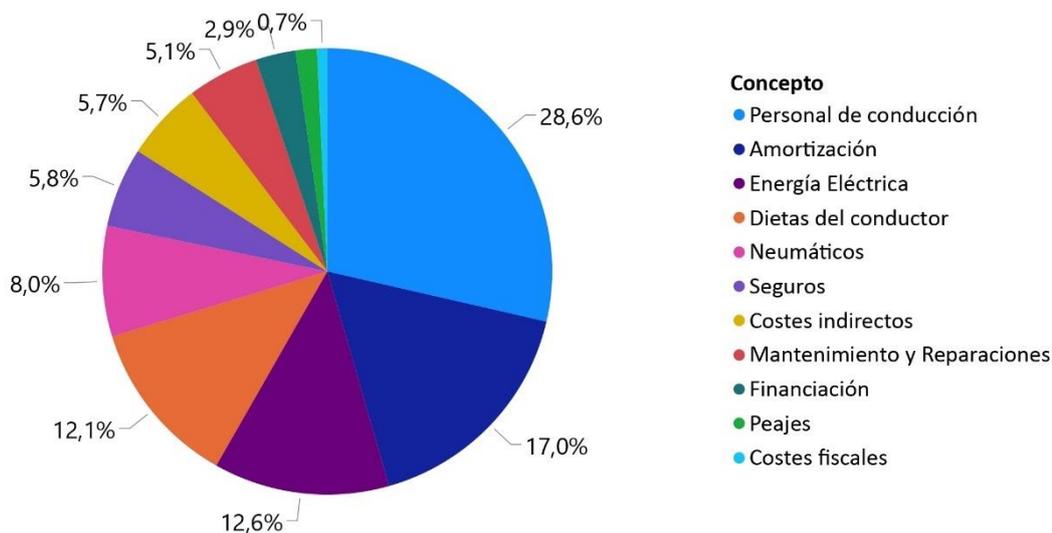


Figura 20. Distribución de costes anuales para el Lion Electric eLion8T®.

Elaboración propia con base en la Tabla 10.

A partir de la Figura 19 y la Figura 20, es posible determinar que el salario del conductor constituye un porcentaje de entre 28,6 % y 31,3 %, respecto a los gastos de la operación. La inversión en energía eléctrica es también considerable, representando entre el 11,2 % y el 12,6 % de la inversión anual. Además, el coste de amortización del vehículo, las dietas del conductor y el gasto anual en neumáticos son también elevados. Estos cinco valores mencionados constituyen más del 75 % de los gastos anuales de operación de los vehículos eléctricos propuestos para el estudio.

6.1.3. Comparación de costes de operación

Comparando los costes totales asociados a la operación logística, se obtiene una diferencia máxima de 14.296,76 €, existente entre el Tesla Semi® y el Freightliner Cascadia®; evidenciándose que el vehículo de combustión interna tiene un coste de operación mayor que el vehículo eléctrico, como se muestra en la Figura 21. En forma porcentual, la reducción de costes es del 14,87 %:

$$\begin{aligned} \text{Reducción} &= \frac{\text{Coste}_{\text{min eléctrico}} - \text{Coste}_{\text{max diésel}}}{\text{Coste}_{\text{min eléctrico}}} \cdot 100 & (8) \\ &= \frac{96.143,70 - 110.440,46}{96.143,70} \cdot 100 = -14,87 \% \end{aligned}$$

Es necesario tener en cuenta que este resultado se obtuvo para las condiciones específicas planteadas en la sección 5.2. La variación de estas condiciones, sobre todo de las que afectan en mayor medida el coste de operación, puede generar una alteración considerable en los resultados obtenidos.

Las variables que más pueden afectar el coste de las operaciones son: el coste inicial del vehículo, la vida útil del mismo, y el coste de la energía (combustible o electricidad). Además, el coste de las operaciones se puede ver influenciado por factores como la carga impositiva o los costes de exportación.

Entre las principales diferencias en costes, se encuentra el valor asociado a la disolución de urea, que es necesaria en el vehículo de combustión interna, pero que no se emplea en el vehículo eléctrico. Por otra parte, la cabeza tractora del vehículo eléctrico presenta cuatro neumáticos menos que la del vehículo diésel, con el consiguiente ahorro anual que esto implica.

Adicionalmente, la mayor vida útil garantizada al vehículo eléctrico permite que éste tenga un coste de amortización anual menor, a pesar de que el coste de adquisición resulta más elevado.

Considerando la influencia de múltiples variables, además de los costes, se propone en la sección 6.4 una matriz multicriterio para la toma de decisiones, que considera los diferentes factores, y no solamente el coste total.

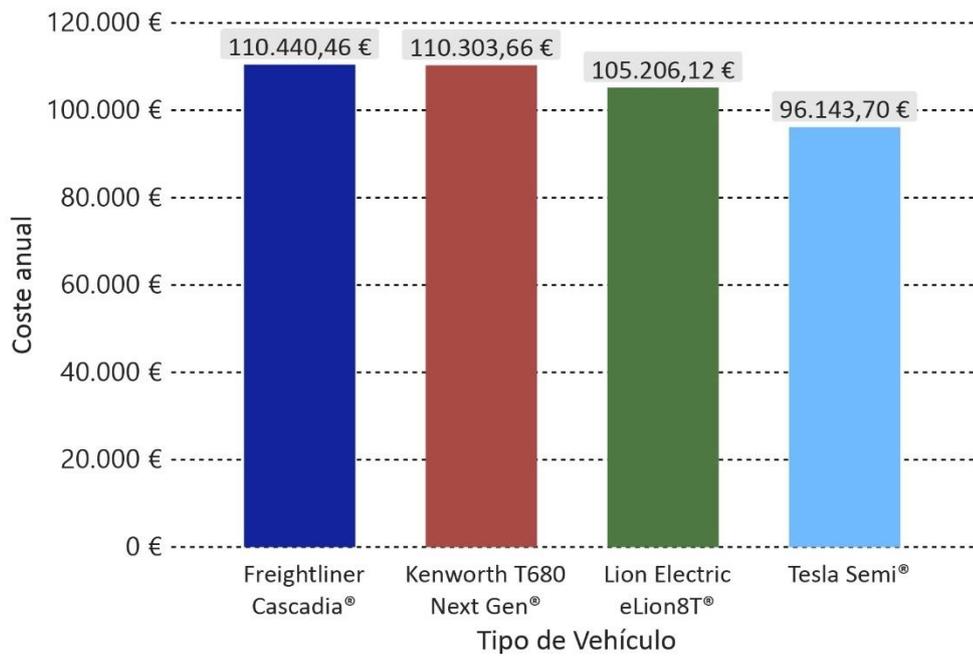


Figura 21. Diferencia de los costes anuales de operación.

Elaboración propia con base en los datos de la Tabla 9 y la Tabla 10.

Se presentan los costes totales aplicables a la operación logística de los vehículos propuestos. El coste total se obtiene sumando los costes independientes del tipo de vehículo, los costes dependientes del vehículo y los costes estimados para el semirremolque, que es el mismo en todos los vehículos.

Se encontró que los vehículos propulsados por motor eléctrico podrían generar una reducción en costes de hasta el **14,87 %** anual, comparado con los costes estimados para los vehículos diésel.

6.2. Impacto ambiental de la operación logística

Se calculó la huella de carbono generada por la operación anual de los vehículos modelo, según los datos propuestos en la sección 3.2. Se presenta además una comparación de los diferentes valores obtenidos.

6.2.1. Emisiones estimadas para los vehículos diésel

Se considera el uso del subíndice “1”, para las variables asociadas al consumo de combustible y las emisiones del Freightliner Cascadia®; y el subíndice “2”, para las variables asociadas al Kenworth T680 Next Gen®.

Considerando que cada vehículo recorre aproximadamente 100.000 km anuales, y conociendo el valor del consumo estimado del combustible (en litros por kilómetro), es posible calcular el consumo anual de combustible como:

$$Q_1 = 100.000 \frac{km}{año} \cdot 0,253 \frac{litros}{km} = 25.300 \frac{litros}{año}$$

$$Q_2 = 100.000 \frac{km}{año} \cdot 0,261 \frac{litros}{km} = 26.100 \frac{litros}{año}$$

Teniendo en cuenta el consumo anual de combustible, y considerando los datos obtenidos de las calculadoras diseñadas por las organizaciones Commercial Fleet (2021) y Carbon Footprint (2021), se calculan dos valores de emisiones para los vehículos modelo.

Se acuerdo con la primera opción, se tiene una equivalencia de 2,62 kg CO₂ por litro de diésel (commercialfleet.org, 2021):

$$P_{1_1} = 2,62 \frac{kg CO_2}{litro} \cdot 25.300 \frac{litros}{año} = 66.286 \frac{kg CO_2}{año}$$

$$P_{2_1} = 2,62 \frac{kg CO_2}{litro} \cdot 26.100 \frac{litros}{año} = 68.382 \frac{kg CO_2}{año}$$

Por otra parte, de acuerdo con la segunda fuente, la equivalencia es de 2,5459 kg CO₂ por cada litro de combustible consumido (Carbon Footprint Ltd, 2021):

$$P_{1_2} = 2,5459 \frac{kg CO_2}{litro} \cdot 25.300 \frac{litros}{año} = 64.411 \frac{kg CO_2}{año}$$

$$P_{2_2} = 2,5459 \frac{kg CO_2}{litro} \cdot 26.100 \frac{litros}{año} = 66.448 \frac{kg CO_2}{año}$$

En la Figura 22 se presenta la comparación de los valores de las emisiones durante un año, calculados para los dos vehículos seleccionados en el estudio.

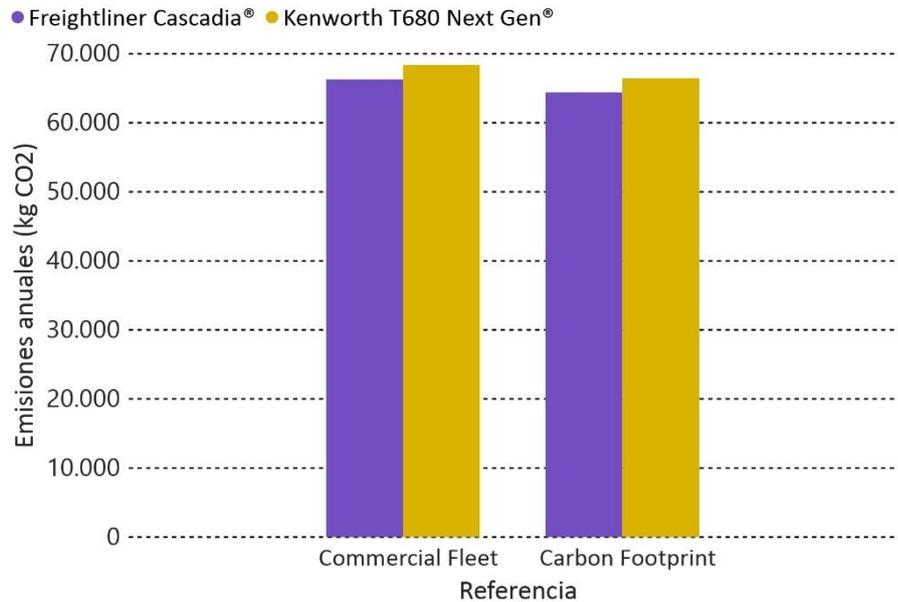


Figura 22. Estimación de emisiones para los vehículos diésel.

Elaboración propia.

6.2.2. Emisiones estimadas para los vehículos eléctricos

Se empleará el subíndice “3” para indicar las variables asociadas al Tesla Semi®, y el subíndice “4” para las variables asociadas al vehículo Lion Electric eLion8T®.

Teniendo en cuenta que se estima un recorrido anual de 100.000 km para cada vehículo seleccionado, y el consumo de energía eléctrica aproximado, se calcula a continuación el consumo anual de energía eléctrica:

$$Q_3 = 100.000 \frac{km}{año} \cdot 1,25 \frac{kWh}{km} = 125.000 \frac{kWh}{año}$$

$$Q_4 = 100.000 \frac{km}{año} \cdot 1,55 \frac{kWh}{km} = 155.000 \frac{kWh}{año}$$

Se consideran los valores para los Estados Unidos, en dos años diferentes: en el año 2016 (0,463 kg CO₂/kWh) (United States Environmental Protection Agency, 2018) y en el año 2019 (0,417 kg CO₂/kWh) (U.S. Energy Information Administration, 2019):

$$2016 \rightarrow P_{3_1} = 0,463 \frac{kg CO_2}{kwh} \cdot 125.000 \frac{kWh}{año} = 57.875 \frac{kg CO_2}{año}$$

$$2019 \rightarrow P_{3_2} = 0,417 \frac{kg CO_2}{kwh} \cdot 125.000 \frac{kWh}{año} = 52.125 \frac{kg CO_2}{año}$$

$$2016 \rightarrow P_{4_1} = 0,463 \frac{kg CO_2}{kwh} \cdot 155.000 \frac{kWh}{año} = 71.765 \frac{kg CO_2}{año}$$

$$2019 \rightarrow P_{4_2} = 0,417 \frac{kg CO_2}{kwh} \cdot 155.000 \frac{kWh}{año} = 64.635 \frac{kg CO_2}{año}$$

Por otra parte, se toman como referencia las estimaciones para la producción de energía eléctrica en Reino Unido en el año 2020 (0,372 kg CO₂/kWh), en el 2030 (0,209 kg CO₂/kWh) y en el 2050 (0,023 kg CO₂/kWh) (Pike, 2012):

$$2020 \rightarrow P_{3_3} = 0,372 \frac{kg CO_2}{kwh} \cdot 125.000 \frac{kWh}{año} = 46.500 \frac{kg CO_2}{año}$$

$$2030 \rightarrow P_{3_4} = 0,209 \frac{kg CO_2}{kwh} \cdot 125.000 \frac{kWh}{año} = 26.125 \frac{kg CO_2}{año}$$

$$2050 \rightarrow P_{3_5} = 0,023 \frac{kg CO_2}{kwh} \cdot 125.000 \frac{kWh}{año} = 2.875 \frac{kg CO_2}{año}$$

$$2020 \rightarrow P_{4_3} = 0,372 \frac{kg CO_2}{kwh} \cdot 155.000 \frac{kWh}{año} = 57.660 \frac{kg CO_2}{año}$$

$$2030 \rightarrow P_{4_4} = 0,209 \frac{kg CO_2}{kwh} \cdot 155.000 \frac{kWh}{año} = 32.395 \frac{kg CO_2}{año}$$

$$2050 \rightarrow P_{4_5} = 0,023 \frac{kg CO_2}{kwh} \cdot 155.000 \frac{kWh}{año} = 3.565 \frac{kg CO_2}{año}$$

El dato obtenido para el factor de emisiones en España, en el 2019, indica una generación de 0,207 kg de CO₂ por cada kWh de energía eléctrica generada (European Environment Agency, 2020).

$$2019 \rightarrow P_{3_6} = 0,207 \frac{kg CO_2}{kwh} \cdot 125.000 \frac{kWh}{año} = 25.875 \frac{kg CO_2}{año}$$

$$2019 \rightarrow P_{4_6} = 0,207 \frac{kg CO_2}{kwh} \cdot 155.000 \frac{kWh}{año} = 32.085 \frac{kg CO_2}{año}$$

Para la Unión Europea, dependiendo de la fuente consultada se obtienen diferentes valores. Se considera una equivalencia de 0,2958 kg CO₂ por kWh de energía eléctrica generada en el 2016 (European Environment Agency, 2020), un factor de emisiones de 0,275 kg CO₂/KWh en el 2019, y una proyección de 0,09681 kg CO₂/KWh para el año 2030 (European Environment Agency, 2020):

$$2016 \rightarrow P_{3_7} = 0,2958 \frac{kg CO_2}{kwh} \cdot 125.000 \frac{kWh}{año} = 36.975 \frac{kg CO_2}{año}$$

$$\begin{aligned}
 2019 \rightarrow P_{3_8} &= 0,275 \frac{kg CO_2}{kwh} \cdot 125.000 \frac{kWh}{año} = 34.375 \frac{kg CO_2}{año} \\
 2030 \rightarrow P_{3_9} &= 0,09681 \frac{kg CO_2}{kwh} \cdot 125.000 \frac{kWh}{año} = 12.101 \frac{kg CO_2}{año} \\
 2016 \rightarrow P_{4_7} &= 0,2958 \frac{kg CO_2}{kwh} \cdot 155.000 \frac{kWh}{año} = 45.849 \frac{kg CO_2}{año} \\
 2019 \rightarrow P_{4_8} &= 0,275 \frac{kg CO_2}{kwh} \cdot 155.000 \frac{kWh}{año} = 42.625 \frac{kg CO_2}{año} \\
 2030 \rightarrow P_{4_9} &= 0,09681 \frac{kg CO_2}{kwh} \cdot 155.000 \frac{kWh}{año} = 15.006 \frac{kg CO_2}{año}
 \end{aligned}$$

En la Figura 23 se presentan los resultados obtenidos de los cálculos desarrollados en esta sección, comparando las emisiones correspondientes a los dos vehículos seleccionados. Se evidencia que el vehículo Lion Electric eLion8T® tiene un mayor consumo energético, lo que influye en las emisiones estimadas para la operación del vehículo.

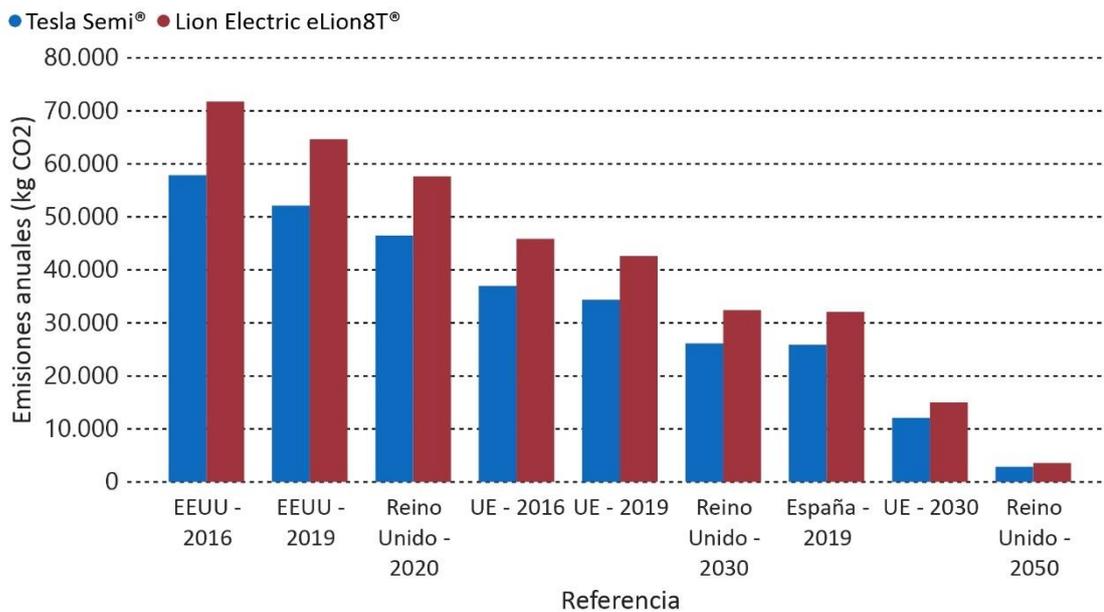


Figura 23. Estimación de emisiones para los vehículos eléctricos.

Elaboración propia.

El análisis se realizó tomando en consideración las emisiones generadas cuando la energía eléctrica proviene de fuentes no renovables (carbón, petróleo, gas natural). Las fuentes bibliográficas consultadas consideran que la energía hidroeléctrica genera cero emisiones de dióxido de carbono. Se verifica la importancia de ir adoptando, a través del tiempo, otras

fuentes de energía limpias (solar, eólica, mareomotriz, geotérmica), que permitan reducir el impacto ambiental de la generación de electricidad.

Además, se demuestra también la relevancia que tienen las regulaciones y la participación de los gobiernos, a nivel nacional o regional, para impulsar el empleo de fuentes de energía limpias, con objetivos concretos a corto y largo plazo.

6.2.3. Comparación de emisiones anuales generadas

En la Tabla 11 se presenta un resumen de los resultados estimados en los cálculos anteriores. Además, se calcula la diferencia máxima obtenida entre los diferentes valores calculados.

Tabla 11. Emisiones anuales asociadas a la operación de transporte

Referencia	Freightliner Cascadia® (Emisiones, en kg de CO₂)	Kenworth T680 Next Gen® (Emisiones, en kg de CO₂)
Calculadora Commercial Fleet	66.286	68.382
Calculadora Carbon Footprint	64.411	66.448
	Tesla Semi® (Emisiones, en kg de CO₂)	Lion Electric eLion8T® (Emisiones, en kg de CO₂)
Estados Unidos 2016	57.875	71.765
Estados Unidos 2019	52.125	64.635
España 2019	25.875	32.085
Reino Unido 2020	46.500	57.660
Reino Unido 2030	26.125	32.395
Reino Unido 2050	2.875	3.565
Unión Europea 2016	36.975	45.849
Unión Europea 2019	34.375	42.625
Unión Europea 2030	12.101	15.006

Elaboración propia, con la información presentada en las secciones 6.2.1 y 6.2.2.

Para el año 2020, la reducción máxima que se obtendría se define como:

$$\begin{aligned} \text{Reducción} &= \frac{\text{Emisiones}_{\text{min}_{\text{eléctrico}}} - \text{Emisiones}_{\text{max}_{\text{diésel}}}}{\text{Emisiones}_{\text{min}_{\text{eléctrico}}}} \cdot 100 & (9) \\ &= \frac{25.875 - 68.382}{25.875} \cdot 100 = -164.28 \% \end{aligned}$$

Por otra parte, para el año 2030, la reducción máxima se calcula como:

$$\begin{aligned} \text{Reducción} &= \frac{\text{Emisiones}_{\text{min}_{\text{eléctrico}}} - \text{Emisiones}_{\text{max}_{\text{diésel}}}}{\text{Emisiones}_{\text{min}_{\text{eléctrico}}}} \cdot 100 & (10) \\ &= \frac{12.101 - 68.382}{12.101} \cdot 100 = -465,10 \% \end{aligned}$$

Se evidencia la diferencia que existe entre los valores de las emisiones anuales, para diferentes contextos nacionales y regionales (Estados Unidos, España, Reino Unido, Unión Europea). En la mayoría de los casos, se observa que las emisiones anuales generadas por el vehículo diésel superan a las emisiones asociadas a la operación del vehículo eléctrico propuesto, encontrándose una diferencia máxima de hasta el **164,28 %** para el año 2020, y de hasta un **465,10 %**, para el año 2030.

Por otra parte, aunque queda patente el esfuerzo que se está realizando a nivel mundial para reducir el factor de emisiones asociadas a la generación de energía eléctrica, falta mucho para conseguir una implementación completa de fuentes de energía limpias para la generación de electricidad.

Las regulaciones implementadas proporcionan un primer acercamiento para la reducción de emisiones; sin embargo, es necesario una mayor participación de los diferentes agentes (Estado, Empresa, Organizaciones Internacionales), en la creación de proyectos con objetivos concretos para la reducción de los niveles de emisiones actuales.

6.3. Modelo de gestión ecológica a largo plazo

En este apartado se presentan los resultados obtenidos al calcular la rentabilidad a largo plazo de los vehículos modelo, tomando como referencia la variación porcentual promedio en los costes, según los valores calculados en la sección 5.4. Además, se comparan los resultados obtenidos, y se estima la generación acumulada de emisiones durante el período de tiempo seleccionado.

6.3.1. Metodología de cálculo de los costes a largo plazo

Se realiza el cálculo de los costes para un período de ocho años, correspondiente a la totalidad de la vida útil propuesta para los vehículos propulsados por un motor de combustión interna, y a dos tercios de la vida útil propuesta para los vehículos propulsados por un motor eléctrico.

Se asume que los costes para el primer año corresponden a los valores presentados en la Tabla 9 y la Tabla 10. Para los años siguientes, se propone una variación en forma de serie geométrica, donde cada valor cambia respecto al del año anterior, según los porcentajes estimados en la Tabla 7, de la forma:

$$X_{n_i} = X_{n_{i-1}} \cdot (1 + V_i) \quad 8 \leq n < 1 \quad (11)$$

Donde X_{n_i} es el valor de cada coste (i) al año n , $X_{n_{i-1}}$ es el valor del coste el año previo y V_i es la variación porcentual (dividida entre 100) que tiene el coste en cuestión.

Es importante tener en cuenta que los costes de amortización y de financiación son constantes, y que los costes indirectos corresponden al 6 % de la suma de los demás costes, para los ocho años de análisis. Por otra parte, el total acumulado para los ocho años se calcula como:

$$X_{T_i} = X_{i_1} + \sum_{n=2}^8 X_{n_i} \quad (12)$$

$$X_N = \sum_{n=1}^i X_{T_i} \quad (13)$$

Donde X_{T_i} es el valor total acumulado de cada coste (i) a ocho años, X_{i_1} es el valor de cada coste al año 1, X_{n_i} es el valor de cada coste en los años siguientes, hasta el octavo año de operación y X_N es la suma del total acumulado de todos los costes.

6.3.2. Rentabilidad de la operación de los vehículos diésel

A partir de la metodología de cálculo propuesta en la sección anterior, se calcularon los costes para ocho años de operación de los vehículos diésel seleccionados, para las condiciones de variación estimadas en el entorno español y el contexto de la Unión Europea. Los resultados se presentan en el Anexo D, desde la Tabla 26 hasta la Tabla 29.

Se estimó que, en el contexto económico español, el coste acumulado de la operación logística sería de 896.123,56 € para el Freightliner Cascadia®, y de 895.385,74 € para el Kenworth T689 Next Gen®. Por otra parte, en el contexto económico de la Unión Europea, el coste acumulado a ocho años sería de 912.038,89 € para el Freightliner Cascadia®, y de 911.363,26 € para el Kenworth T680 Next Gen®.

En la Figura 24 y la Figura 25 se muestra la variación de los costes para ambos vehículos, de acuerdo a las condiciones económicas propuestas.

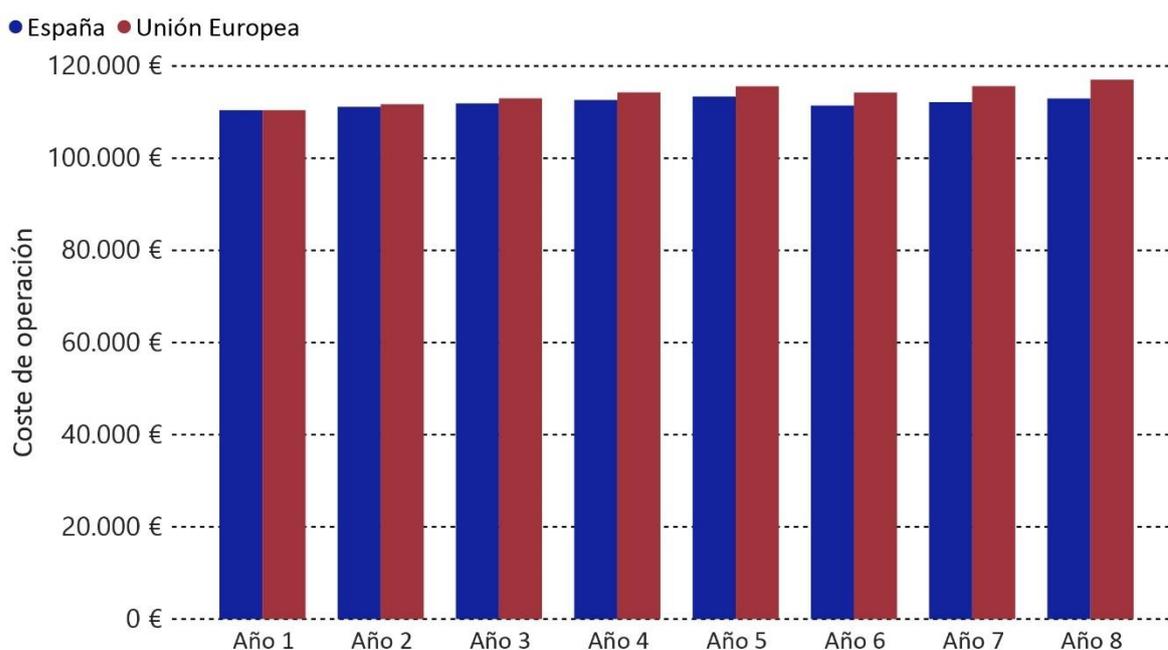


Figura 24. Evolución de los costes a largo plazo del Freightliner Cascadia®.

Elaboración propia con base en los datos de la Tabla 26 y la Tabla 27.

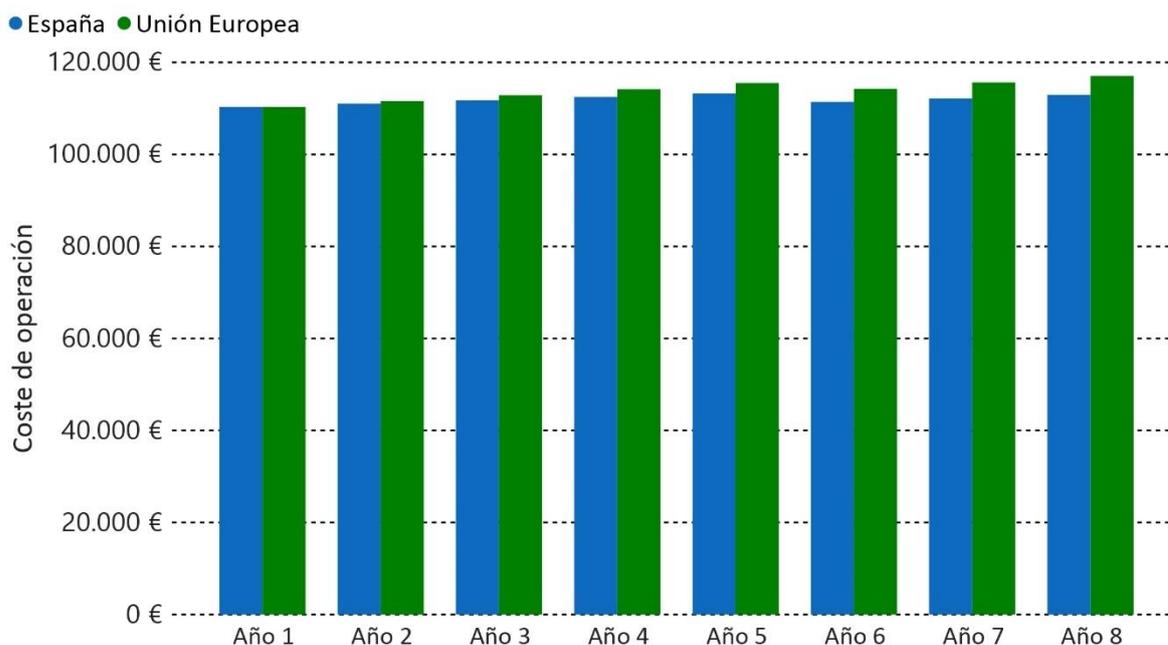


Figura 25. Evolución de los costes a largo plazo del Kenworth T680 Next Gen®.

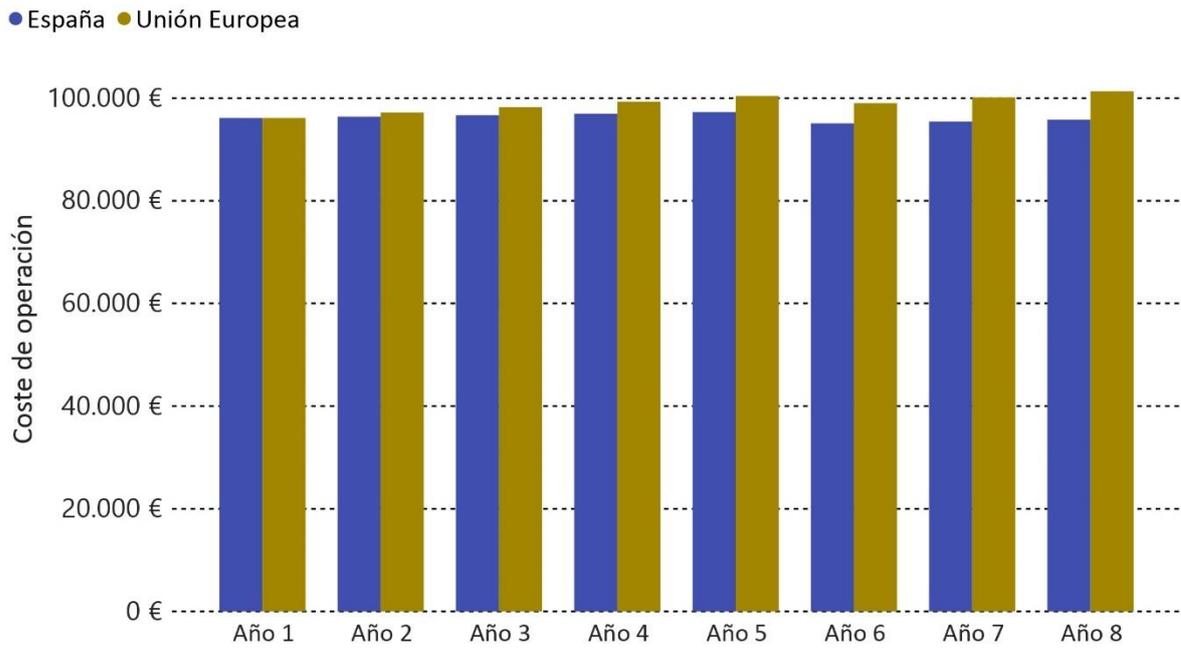
Elaboración propia con base en los datos de la Tabla 28 y la Tabla 29.

6.3.3. Rentabilidad de la operación de los vehículos eléctricos

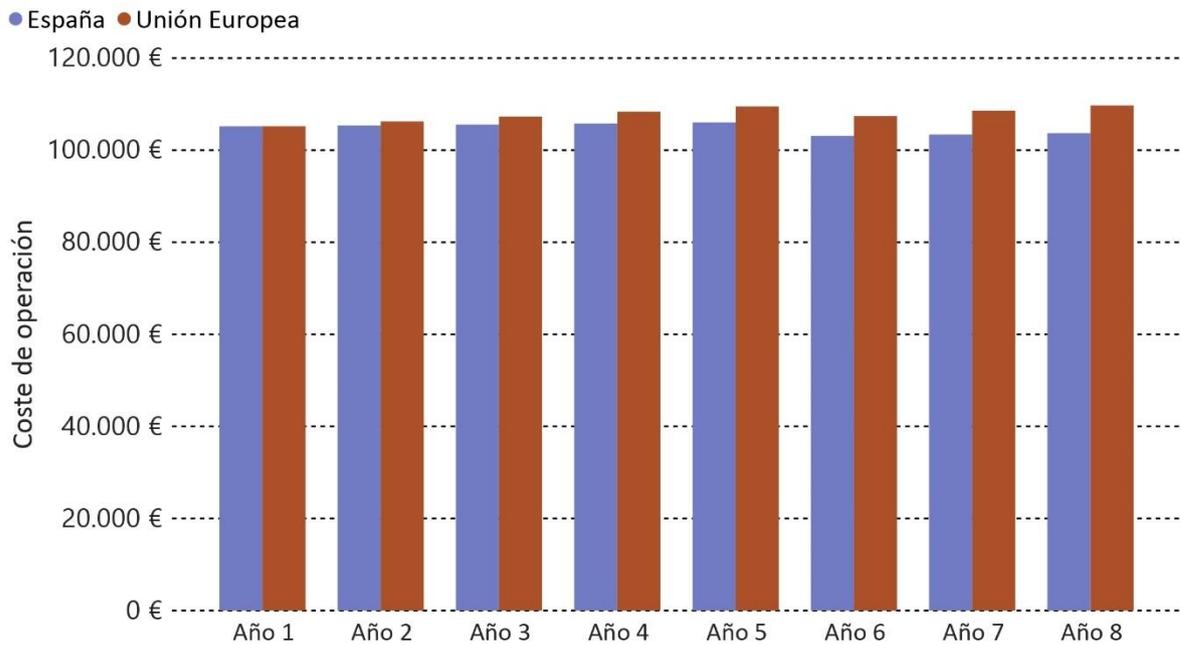
Aplicando la metodología de cálculo descrita anteriormente, se calcularon los costes asociados a una operación de los vehículos eléctricos propuestos, durante ocho años.

Desde la Tabla 30 hasta la Tabla 33 del Anexo D se incluye la estimación de los costes a largo plazo, y el cálculo del coste acumulado total. Para las condiciones propuestas en el contexto económico español, se obtuvo un valor acumulado a ocho años de 769.774,49 € para el Tesla Semi®, y de 838.130,02 € para el Lion Electric eLion8T®. Por otra parte, para el entorno económico europeo, se obtuvo una estimación de 791.846,89 € para el Tesla Semi®, y un valor de 862.320,06 € para el Lion Electric eLion8T®.

En la Figura 26 y la Figura 27 se muestra la variación de los costes de operación logística, para ambos vehículos evaluados.



*Figura 26. Evolución de los costes a largo plazo del Tesla Semi®.
Elaboración propia con base en los datos de la Tabla 30 y la Tabla 31.*



*Figura 27. Evolución de los costes a largo plazo del Lion Electric eLion8T®.
Elaboración propia con base en los datos de la Tabla 32 y la Tabla 33.*

6.3.4. Comparación de la rentabilidad a largo plazo

En la Tabla 12 se presenta el resumen de los resultados obtenidos al calcular los costes a largo plazo para los vehículos propulsados con un motor de combustión interna y los vehículos eléctricos, de acuerdo con las condiciones económicas planteadas para el entorno de España y el de la Unión Europea.

Tabla 12. Comparación de costes totales a largo plazo

	Contexto España	Contexto Unión Europea
Freightliner Cascadia®	896.123,56 €	912.038,89 €
Kenworth T680 Next Gen®	895.385,74 €	911.363,26 €
Tesla Semi®	769.774,49 €	791.846,89 €
Lion Electric eLion8T®	838.130,02 €	862.320,06 €

(Elaboración propia)

La reducción máxima alcanzable a largo plazo se calcula como:

$$Reducción = \frac{Coste_{min_{eléctrico}} - Coste_{max_{diésel}}}{Coste_{min_{eléctrico}}} \cdot 100 \quad (14)$$

Para el contexto económico propuesto para España:

$$Reducción = \frac{769.774,49 - 896.123,56}{769.774,49} \cdot 100 = -16,41 \%$$

Según el contexto propuesto para la Unión Europea:

$$Reducción = \frac{791.846,89 - 912.038,89}{791.846,89} \cdot 100 = -15,18 \%$$

A partir de los datos de la Tabla 12 se construyó la Figura 28, que muestra la comparación de los diferentes costes estimados a un período de ocho años.

Se evidencia que las condiciones de variación propuestas para el entorno económico español generan un menor coste acumulado a largo plazo, que las condiciones económicas propuestas para el promedio de la Unión Europea. Esta diferencia se debe a tres factores: menor valor promedio de la inflación, reducido incremento de salario durante el período analizado y disminución en los costes promedio de la energía eléctrica.

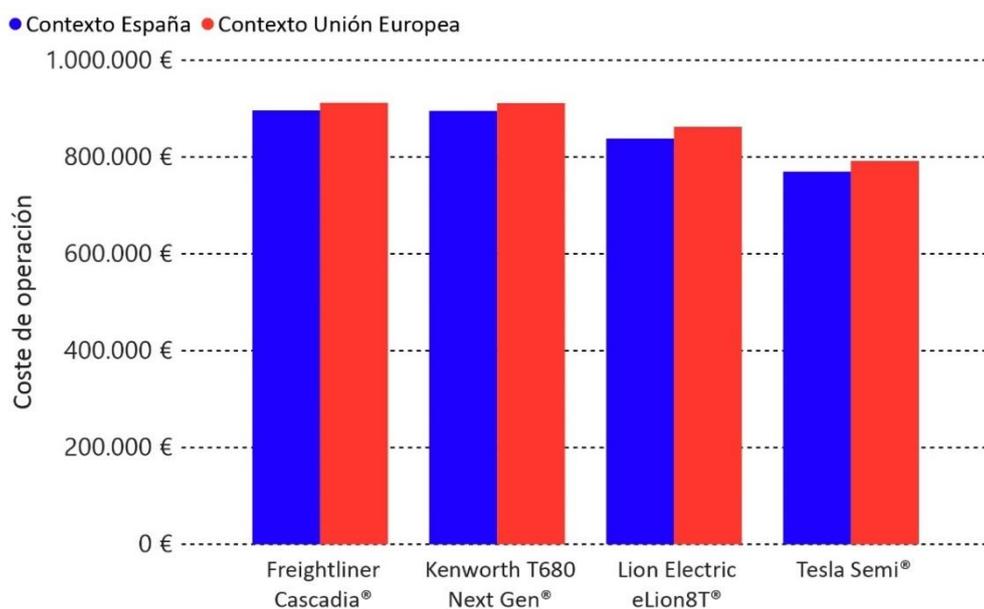


Figura 28. Comparación de los costes acumulados a largo plazo.

Elaboración propia con base en los datos de la Tabla 12.

Conocer con exactitud las variaciones en los costes a largo plazo es importante para la planificación adecuada de un proceso de transformación ecológica, ya que permite examinar la opción más rentable en un período de tiempo determinado por la empresa en cuestión. Por eso, la rentabilidad a largo plazo es una de las opciones que se incluyen en la valoración de la matriz multicriterio, desarrollada en la sección 6.4.

6.3.5. Generación de emisiones a largo plazo

De acuerdo con la proyección de los factores de emisión, mostrados en la Tabla 8, y la proyección anual estimada, que se incluye en la Tabla 25, se calculó la proyección acumulada de emisiones de dióxido de carbono, para el período 2019 - 2030, que se presenta en la Tabla 34 del Anexo D.

Se asume que el combustible diésel mantiene un factor de emisiones constante de 2,62 kg de CO₂ por litro, durante el período propuesto. Por otra parte, para los vehículos eléctricos, se toman los factores anuales propuestos en la Tabla 25, tanto para España como para la Unión Europea.

En el período 2019 - 2030, considerando la proyección estimada para España, la operación del Freightliner Cascadia® generaría un total de 795.432,00 kg de CO₂; y el Kenworth T680 Next

Gen[®], 820.584,00 kg de CO₂. Para las condiciones propuestas en la Unión Europea, se obtuvieron las mismas cantidades, considerando el factor de emisiones constante del combustible diésel.

Por otra parte, para las condiciones propuestas en España, la operación con el Tesla Semi[®] produciría un total de 250.650,00 kg de CO₂; y, la del Lion Electric eLion8T[®], 310.806,00 kg de CO₂. En el contexto planteado para la Unión Europea, se obtendría un total de 278.857,50 kg de CO₂ con el Tesla Semi[®], y 345.783,30 kg de CO₂ con el vehículo Lion Electric eLion8T. Resumiendo, en la Tabla 13 se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 13. Comparación de emisiones acumuladas a largo plazo

	Contexto España (Emisiones, en kg de CO₂)	Contexto Unión Europea (Emisiones, en kg de CO₂)
Freightliner Cascadia[®]	795.432,00	795.432,00
Kenworth T680 Next Gen[®]	820.584,00	820.584,00
Tesla Semi[®]	250.650,00	278.857,50
Lion Electric eLion8T[®]	310.806,00	345.783,30

(Elaboración propia)

La reducción máxima alcanzable en el período propuesto se calcula como:

$$Reducción = \frac{Emisiones_{min\,eléctrico} - Emisiones_{max\,diésel}}{Emisiones_{min\,eléctrico}} \cdot 100 \quad (15)$$

De acuerdo con las proyecciones encontradas para España:

$$= \frac{250.650,00 - 820.584,00}{250.650,00} \cdot 100 = -227,38 \%$$

Según las proyecciones propuestas para la Unión Europea:

$$= \frac{278,857,50 - 820.584,00}{278,857,50} \cdot 100 = -194,27 \%$$

En la Figura 29 se muestra la variación de las emisiones de CO₂ en el período de análisis. Por otra parte, en la Figura 30 se presenta la comparación del total estimado de las emisiones.

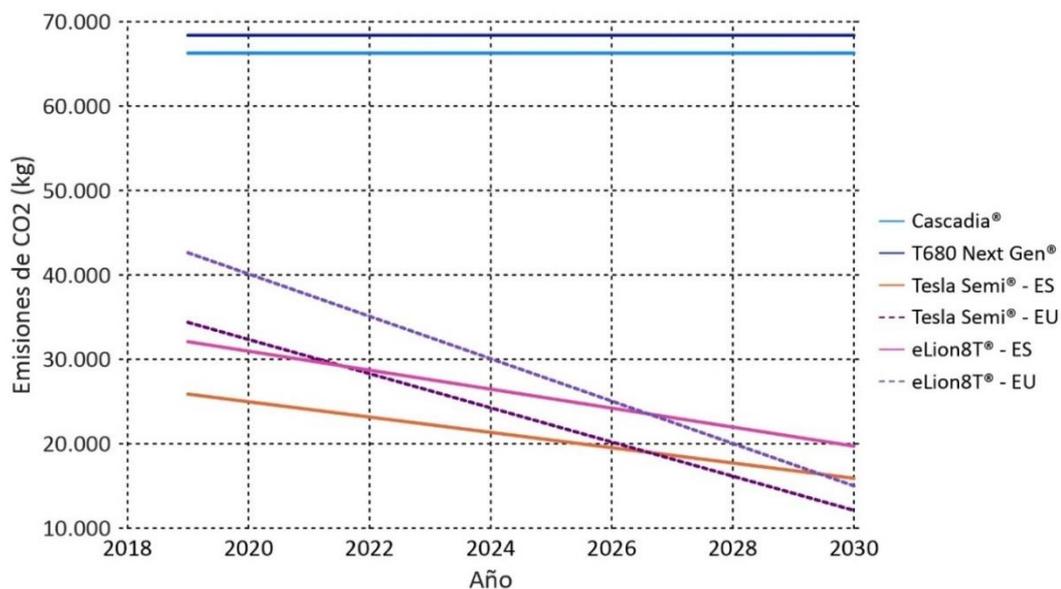


Figura 29. Variación de las emisiones anuales a largo plazo.

(Elaboración propia)

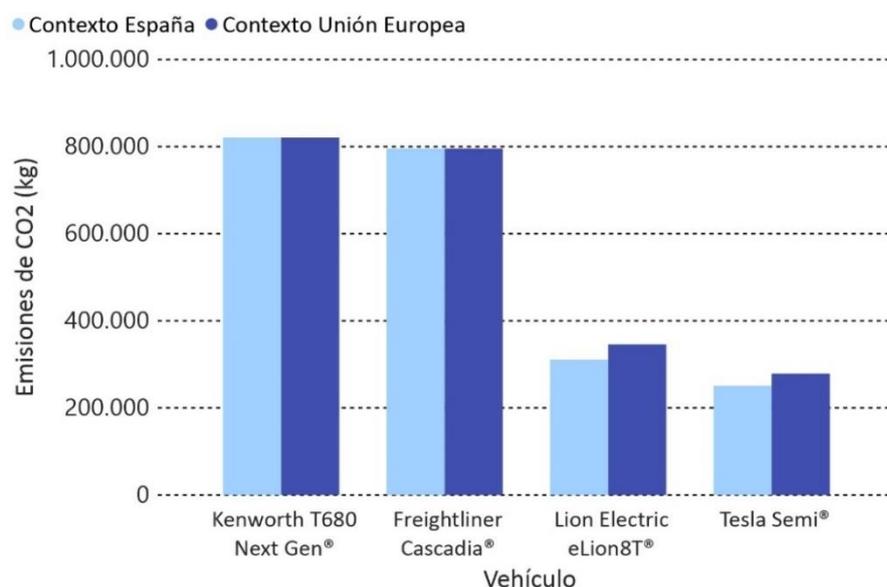


Figura 30. Comparación de las emisiones acumuladas a largo plazo.

(Elaboración propia)

Se presentan los resultados de rentabilidad a largo plazo de los vehículos modelo, y se estima la generación acumulada de emisiones durante el período de tiempo seleccionado. La alternativa ecológica generaría un ahorro de hasta un **16,41 %** en los costes a largo plazo, y una reducción de hasta un **227,38 %** en las emisiones a largo plazo.

Además, se destaca la importancia de promover políticas para la implementación de fuentes de energía limpias, que puedan reducir en mayor manera el factor de emisiones asociadas a la generación de electricidad.

6.4. Propuesta de valoración multicriterio

En este estudio se propone una matriz de decisión multicriterio de elaboración propia, para facilitar la toma de decisiones con respecto a la gestión ecológica de una empresa.

A partir de una selección de factores, y de la ponderación que el usuario asigne, se dispone de una herramienta de decisión adicional, que respalde el proceso de transformación ecológica que realice una empresa sobre sus operaciones logísticas de transporte de mercancías por carretera.

6.4.1. Propuesta de matriz multicriterio

A continuación, se define una serie de criterios que se consideran importantes, con los cuales se construirá la matriz multicriterio propuesta en la metodología de solución y mostrada en la Tabla 14.

- Coste total: puede considerarse como el factor de decisión más importante, ya que la transformación ecológica propuesta debería alcanzar la reducción de costes asociados a las operaciones.
- Nivel de emisiones de CO₂: adicionalmente, la transformación ecológica propuesta debería reducir el nivel de emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente de la cantidad de dióxido de carbono emitido durante las operaciones logísticas.
- Rentabilidad a largo plazo: es importante verificar también que la alternativa de solución seleccionada proporcione a la empresa una rentabilidad a futuro, y un buen retorno a la inversión desde los primeros meses de uso.
- Cercanía de los proveedores: facilidad de contacto con los proveedores de vehículos, repuestos y servicio técnico, y distancia de los mismos a la empresa, lo que permitiría reducir tiempos de entrega de productos o servicios, y los costes asociados a los mismos.
- Reducción de impuestos: dependiendo del país en cuestión, el uso de alternativas ecológicas para el transporte puede implicar una reducción considerable de los impuestos cargados a la empresa.
- Obtención de certificaciones: la transformación ecológica de la empresa podría abrir la posibilidad de obtener certificaciones de organismos medioambientales a nivel nacional e internacional.

- Mejora de la imagen empresarial: la obtención de las certificaciones anteriormente mencionadas permitiría promocionar la transformación ecológica de la empresa, usando estrategias de marketing adecuadas. Esto produciría una mejora de la imagen empresarial y un aumento de la demanda.
- Atracción de inversiones: una empresa con certificaciones medioambientales y una excelente imagen en el mercado sería más atractiva para los inversionistas, dada la calidad de sus procesos organizacionales.

En la Tabla 14 se presenta la propuesta de matriz multicriterio, siendo n el número de factores elegidos. La variable P_n es la ponderación que asigna el usuario de la matriz a cada criterio, según el nivel de importancia que se defina, teniendo en cuenta la restricción:

$$\sum_{n=1}^n P_n = 100 \quad (16)$$

A cada criterio de decisión se le asigna una calificación A_n (calificación dada a la flota actual) y B_n (calificación dada a una alternativa ecológica). La ponderación total para cada factor se calcula como $A_n \cdot P_n$ y $B_n \cdot P_n$, para la flota actual y para una propuesta de selección, respectivamente. La suma de las ponderaciones calculadas se define como:

$$S_1 = \sum_{n=1}^n A_n \cdot P_n \quad (17)$$

$$S_2 = \sum_{n=1}^n B_n \cdot P_n \quad (18)$$

En función de los resultados obtenidos, será posible decidir cuál es la alternativa que tiene un mayor puntaje, y elegir la mejor opción.

Tabla 14. Matriz multicriterio propuesta

Criterio	Ponderación	Flota actual		Transformación ecológica	
		Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación
Coste total	P_1	A_1	$A_1 \cdot P_1$	B_1	$B_1 \cdot P_1$
Emisiones de CO ₂	P_2	A_2	$A_2 \cdot P_2$	B_2	$B_2 \cdot P_2$
Rentabilidad a largo plazo	P_3	A_3	$A_3 \cdot P_3$	B_3	$B_3 \cdot P_3$
Cercanía con los proveedores	P_4	A_4	$A_4 \cdot P_4$	B_4	$B_4 \cdot P_4$
Reducción de impuestos	P_5	A_5	$A_5 \cdot P_5$	B_5	$B_5 \cdot P_5$
Obtención de certificaciones de calidad	P_6	A_6	$A_6 \cdot P_6$	B_6	$B_6 \cdot P_6$
Mejora de la imagen empresarial	P_7	A_7	$A_7 \cdot P_7$	B_7	$B_7 \cdot P_7$
Atracción de inversiones	P_8	A_8	$A_8 \cdot P_8$	B_8	$B_8 \cdot P_8$
Total	100	-	S_1	-	S_2

(Elaboración propia)

6.4.2. Aplicación al caso propuesto

Se valida la aplicación de la matriz multicriterio propuesta, empleándola para realizar la comparación de los criterios entre el Freightliner Cascadia® y el Tesla Semi®, definiendo las ponderaciones y calificaciones bajo criterio del autor, y calculando los valores para el caso de validación desarrollado a partir de la sección 5.2 de este estudio. Para mayor facilidad en los cálculos, se propone la asignación de ponderaciones en una escala de 2,5 en 2,5 puntos.

La matriz multicriterio permite la realizar ponderaciones según el contexto concreto del usuario, y es una herramienta de decisión cuyo uso puede ser adaptado, dependiendo de la escala de criterios de la empresa que la implemente.

- Coste total: se asigna una ponderación de 25 puntos.

Al haber todavía posibilidades de mejora en las condiciones propuestas para el Tesla Semi®, se da una calificación de 20 puntos al coste total estimado de 96.143,70 €.

Por otra parte, por medio de una relación inversamente proporcional, se asignará la calificación al coste anual del Freightliner Cascadia®, que es de 110.440,46 €:

$$\frac{20 \cdot 96.143,70}{110.440,46} = 17,41 \text{ puntos}$$

- Nivel de emisiones de CO₂: se considera este apartado ligeramente inferior al anterior, con una ponderación de 20 puntos.

De acuerdo con las dos calculadoras empleadas para el Freightliner Cascadia®, se obtienen valores para las emisiones de 66.286 kg de CO₂ y 64.411 kg de CO₂. En promedio, se tiene un valor de 65.348,5 kg de CO₂.

Por otra parte, para las fechas más cercanas a las de la elaboración de este estudio, se obtienen valores asociados a las emisiones del Tesla Semi® en 46.500 kg de CO₂ (según datos para Reino Unido en 2020), 36.975 kg de CO₂ (según datos de la Unión Europea en 2019), 25.875 kg de CO₂ (según datos para España en 2019), o 52.125 kg de CO₂ (según datos para los Estados Unidos en 2019). En promedio, el valor es de 40.368,75 kg de CO₂.

Dadas las amplias posibilidades de mejora en este apartado, se asigna un valor de 15 puntos para la operación del vehículo Tesla Semi®. Por relación inversamente proporcional:

$$\frac{15 \cdot 40.368,75}{65.348,50} = 9,27 \text{ puntos}$$

- Rentabilidad a largo plazo: se reconoce la importancia de obtener rentabilidad, dándole una ponderación de 15 puntos.

De acuerdo a las condiciones planteadas, se obtiene un coste a largo plazo para el Freightliner Cascadia® de 904.081,23 €, calculado como la media entre los valores para las dos condiciones económicas propuestas. De igual forma, se calcula un valor promedio de la operación acumulada de ocho años para el Tesla Semi® de 780.810,69 €, obtenido a partir de los resultados para los dos entornos económicos validados.

Se asigna una calificación de 12 puntos para el desempeño a largo plazo del vehículo eléctrico, y la calificación para el vehículo diésel se calcula con relación inversamente proporcional, como sigue:

$$\frac{12 \cdot 780.810,69}{904.081,23} = 10,36 \text{ puntos}$$

- Cercanía con los proveedores: es también un factor importante; por lo tanto, su ponderación será de 12,5 puntos.

Se conoce que el Freightliner Cascadia® tiene una amplia trayectoria en el mercado internacional, y la compañía fabricante cuenta con presencia en muchos países a nivel global. Por lo tanto, la facilidad de acceso a productos nuevos, repuestos o servicio técnico es elevada, y se asigna una calificación de 10 puntos.

Por otra parte, el Tesla Semi® es un producto nuevo, comercializado en pocos países por el momento, aunque la empresa cuenta con amplia presencia global. Por eso, en este apartado, se califica con 2,5 puntos.

- Reducción de impuestos: dada la variabilidad en este aspecto, fuertemente dependiente del país concreto y de sus regulaciones, se asigna una ponderación de 5 puntos.

Se conoce, además, que el empleo de vehículos de combustible fósil no generará reducciones de impuestos; por lo tanto, su calificación es de 0 puntos.

Por otra parte, el empleo de un vehículo eléctrico ayudará a la empresa a eliminar impuestos a hidrocarburos, a las emisiones, etc., por lo que se asigna una calificación de 4 puntos, que puede variar dependiendo del entorno legal de cada país.

- Obtención de certificaciones medioambientales: son un aspecto que puede reportar ventajas a la empresa; en consecuencia, su ponderación es de 7,5 puntos.

Si la empresa gestiona adecuadamente sus procesos logísticos y la flota de transporte con vehículos de combustible fósil, podría obtener ciertas certificaciones de calidad medioambiental. Por eso, se le da una calificación de 1,5 puntos.

Sin embargo, la transformación ecológica abre amplias posibilidades de certificación de calidad ambiental, por lo que se asigna una calificación de 6 puntos.

- Mejora de la imagen empresarial: es una consecuencia importante que genera la transformación ecológica; por lo tanto, su ponderación es de 10 puntos.

La mejora de la imagen de la empresa está directamente ligada al proceso de gestión y transformación ecológica. Por eso, se asigna una calificación de 2 puntos a la operación con vehículos de combustible fósil, y 8 puntos para la operación logística que se realiza empleando vehículos eléctricos.

- Atracción de inversiones: se considera una ponderación de 5 puntos, dada la incertidumbre en este aspecto, altamente dependiente de una serie de factores externos.

Se considera una calificación de 1 punto para el vehículo modelo de combustible fósil, y de 4 puntos para el vehículo eléctrico. Estas calificaciones cambiarán con las circunstancias económicas concretas del entorno empresarial.

Todas estas ponderaciones y calificaciones se reflejan en la Tabla 15, de la cual se extrae que los procesos actuales de la empresa obtuvieron una calificación de **937,3 puntos**, mientras que la alternativa de solución planteada obtuvo una calificación de **1.181,25 puntos**, según las calificaciones dadas.

Se propone una matriz de decisión multicriterio de elaboración propia, para facilitar la toma de decisiones con respecto a la gestión ecológica de una empresa.

Se destaca la flexibilidad de la matriz multicriterio propuesta, ya que permite la ponderación por parte del usuario, y la adición o eliminación de criterios, según las circunstancias particulares que afectan a cada entorno empresarial. Por eso, la matriz multicriterio se convierte en una herramienta útil para la toma de decisiones que involucren un proceso de transformación ecológica en una empresa de transportes.

Tabla 15. Matriz multicriterio aplicada al caso propuesto

Criterio	Ponderación	Freightliner Cascadia®		Tesla Semi®	
		Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación
Coste total	25	17,41	435,25	20	500
Emisiones de CO ₂	20	9,27	185,40	15	300
Rentabilidad a largo plazo	15	10,36	155,40	12	180
Cercanía con los proveedores	12,5	10	125	2,5	31,25
Reducción de impuestos	5	0	0	4	20
Obtención de certificaciones de calidad	7,5	1,5	11,25	6	45
Mejora de la imagen empresarial	10	2	20	8	80
Atracción de inversiones	5	1	5	5	25
Total	100	-	937,30	-	1.181,25

(Elaboración propia)

6.5. Impacto asociado a la propuesta ecológica

En las secciones previas se propuso una metodología para la transformación ecológica de una empresa de transporte de mercancías por carretera; y se validó, mediante un caso propuesto, la implementación de esta metodología.

Se demostró, a partir de los resultados de la validación, la conveniencia de la transformación ecológica mediante el uso de vehículos eléctricos y de fuentes de energía limpias. A continuación, se describe el posible impacto medioambiental y social que puede generar la producción de energía proveniente de fuentes renovables, y el impacto asociado a la producción y degradación de las baterías empleadas en los vehículos híbridos y eléctricos.

Durante un proceso de transición ecológica, es necesario también que la empresa en cuestión tome en cuenta el impacto medioambiental y social relacionado con las fuentes de las que obtendrá la energía para las operaciones de la flota del transporte.

6.5.1. Impacto ambiental y social en la generación de energías limpias

En un estudio acerca de las diferentes energías renovables, que pueden sustituir al carbón, petróleo o gas natural para la generación de electricidad, Dell y Rand (2004) distinguen las siguientes fuentes: biomasa a partir de material agrícola, uso de la energía solar en paneles o como energía solar térmica, energía geotérmica, hidroeléctrica, uso de turbinas eólicas, energía mareomotriz y energía proveniente de la reacción química del hidrógeno.

De todas las mencionadas anteriormente, la energía hidroeléctrica es la que genera más controversia, por tener un impacto ambiental y social considerable. Por eso, se analizará a continuación en una sección separada de las demás fuentes de energía.

6.5.1.1. Energía hidroeléctrica

Desde finales del siglo XX, se han desarrollado diferentes estudios para evaluar el impacto ambiental de los proyectos hidroeléctricos en diferentes países. Así, Rosenberg et al. (1995), mencionan el impacto causado en el suelo por el desvío de corrientes de agua, o la posterior acumulación de agua en una represa. En un estudio posterior, Rosenberg et al. (1997), advierten sobre los efectos de la acumulación de sustancias tóxicas, como el mercurio, en el flujo de agua relacionado con un proyecto hidroeléctrico, con las consecuencias que dicha acumulación tiene para la biodiversidad del lugar.

En un estudio aplicado a dos proyectos hidroeléctricos desarrollados en Turquía, Berkun (2010), menciona que, a pesar de los múltiples beneficios económicos y sociales obtenidos, existe también un impacto ambiental, reflejado en la erosión del suelo, el cambio en el clima local, la afectación de las especies autóctonas y un incremento del nivel de contaminación derivado de una mayor actividad industrial en las zonas aledañas a los proyectos.

En Brasil, autores como Fearnside han desarrollado múltiples trabajos (publicados en 2001, 2014 y 2016) en los que se evalúa el impacto que han tenido algunos proyectos hidroeléctricos. El impacto ambiental y social incluye la pérdida de recursos forestales, el uso peligroso de sustancias tóxicas (2001), la afectación de las especies locales y de la producción agropecuaria local (2014), entre otros.

Por otra parte, Fearnside (2016) propone la implementación alternativa de fuentes de energía solar o eólica, aprovechando los recursos del país y su ubicación geográfica. Además, menciona la importancia de hacer una revisión y gestión adecuada de las diferentes regulaciones y políticas sociales, para reducir y mitigar los efectos de las centrales hidroeléctricas o de las fuentes de energía alternativas.

En muchas ocasiones, los proyectos hidroeléctricos generan desarrollo económico y social a las comunidades presentes en su área de influencia. Sin embargo, la afectación medioambiental producida puede generar también un problema social, que es necesario tener en cuenta. Los cambios ambientales y geográficos pueden afectar los medios de subsistencia de las comunidades, causando cambios culturales y sociales e incluso provocando desplazamientos de poblaciones (Nguyen, Pham, & de Bruyn, 2017).

Hanna et al. (2016), mencionan que los problemas surgen al no tomar en consideración los factores sociales y culturales de las comunidades afectadas por la construcción de una central hidroeléctrica. Los autores recomiendan la inclusión y participación de las poblaciones locales en la planificación de los proyectos y en la determinación de estrategias de mitigación del impacto generado.

Adicionalmente, Zanotti (2015), menciona que es importante una correcta definición e implementación de políticas ambientales y sociales, que garanticen la participación, protección y aplicación de justicia, para las comunidades afectadas ambiental y socialmente por un proyecto hidroeléctrico.

6.5.1.2. Otras fuentes de energía

En lo referente a otras fuentes de energía consideradas renovables y limpias, diferentes autores destacan que su implementación puede generar un cambio positivo a nivel ambiental, económico y social, dependiendo del contexto en que sean aplicadas. Wei et al. (2010), afirman que la implementación de proyectos de generación de energía a partir de fuentes renovables podría generar un número considerable de nuevos empleos en los Estados Unidos.

En un estudio desarrollado en Nigeria por Maji (2015), se menciona que la implementación de energías renovables (en concreto, la utilización de biomasa), puede tener un impacto positivo en el crecimiento económico del país. Además, se destaca que, para una implementación positiva, se deberá trabajar también en el aspecto regulatorio y en las políticas nacionales.

Hongtao y Wenjia (2018), destacan en un estudio aplicado a China que el desarrollo de una economía sustentable mediante la promoción de energías limpias, puede generar un incremento en el Producto Interno Bruto (PIB) del país, al tiempo que se reducen las diferentes fuentes de contaminación y se genera empleo.

6.5.2. Impacto ambiental y social relacionado con las baterías eléctricas

El uso de los vehículos híbridos y eléctricos reporta múltiples ventajas ecológicas, ya que generan menos emisiones directas de dióxido de carbono durante su operación. Sin embargo, en los últimos años, se ha planteado una problemática ambiental y social relacionada con las baterías que usan estos vehículos, especialmente con los procesos de extracción de las materias primas y de desecho al final de la vida útil.

De acuerdo con Harper et al. (2019), el proceso de extracción de grandes cantidades de litio como materia prima genera un impacto ecológico considerable, especialmente por el gran consumo de agua que se requiere para las actividades de extracción del mineral y procesamiento del mismo. Los autores, por otra parte, resaltan la posibilidad de dar un segundo uso a las baterías, antes de reciclar sus componentes.

Jiao y Evans (2016), destacan la conveniencia de explorar modelos de negocio que permitan dar nuevos usos a las baterías de ion litio, al final de su vida útil, al final de su vida útil en vehículos híbridos y eléctricos. Ahmadi et al. (2014), proponen el uso de estas baterías en los sistemas de generación de energía eléctrica, para cubrir picos de demanda de la energía.

Adicionalmente, es necesario que la gestión de la producción y del ciclo de vida de estas baterías vaya acompañada de regulaciones concretas, que promuevan la reducción del impacto ambiental y social generado.

6.5.3. Propuestas de mejora para la reducción del impacto

A raíz de las problemáticas ambientales y sociales expuestas en los puntos anteriores, relacionadas con el uso de energías renovables para la generación de energía eléctrica, se recogen diferentes contribuciones y recomendaciones para la sostenibilidad y la reducción del impacto asociado.

Klimpt et al. (2002), destacan la necesidad de participación de los gobiernos en la regulación e implementación de políticas para la protección del medio ambiente y de las poblaciones afectadas por los proyectos relacionados con la generación de la energía. Además, Cowan et al. (2010), hacen referencia a la necesidad de considerar múltiples factores y criterios de decisión e involucrar a las diferentes partes interesadas al implementar un proyecto para la generación de energía eléctrica.

De acuerdo con Verduzco y Sánchez (2008), y de Lima y dos Santos (2015), es particularmente importante facilitar la participación de las diferentes comunidades locales en la definición de un proyecto energético, desde las primeras etapas del mismo. De este modo, se facilita la definición de objetivos, estrategias de mitigación y de propuestas de desarrollo que beneficien a la región en la cual se desarrollará el proyecto en cuestión.

Por otra parte, Pimentel (2021), analiza el papel de la Responsabilidad Social Corporativa (RSC), como un medio de integración entre las empresas y las diferentes partes involucradas, con el fin de conseguir un impacto socioeconómico y ambiental positivo.

Después de haber demostrado la conveniencia de la transformación ecológica mediante el uso de vehículos eléctricos y de fuentes de energía limpias, se describe el posible impacto medioambiental y social que puede generar la producción de energía proveniente de fuentes renovables (erosión, afectación de la biodiversidad), y el impacto asociado a la producción y degradación de las baterías (contaminación durante los procesos de extracción y desecho) empleadas en los vehículos híbridos y eléctricos.

La revisión de los diferentes factores que contribuyen al impacto ambiental y social en la generación de la energía eléctrica es de vital importancia en la selección de los proyectos y en los procesos de toma de decisiones de las empresas.

7. Conclusiones y trabajos futuros

7.1. Conclusiones

En el presente estudio, se desarrolló una **metodología para la gestión ecológica de la flota vehicular de una empresa logística de transporte de mercancías por carretera**. Se establecieron las etapas y procesos que permitirían optimizar los costes y disminuir las emisiones.

Se estimaron los **costes asociados a la operación logística durante un año**, empleando un modelo concreto de vehículo a diésel y un vehículo eléctrico. Se encontró que, al utilizar el vehículo eléctrico, se reducen los costes de operación en un 14,87 %.

Se realizó el **estudio del impacto ambiental**. En el caso del vehículo diésel, se utilizaron calculadoras de huella de carbono, para estimar las emisiones de dióxido de carbono durante un año. Para el vehículo eléctrico, se estimaron estos valores a partir de la revisión bibliográfica de las emisiones asociadas a los procesos de generación de energía eléctrica. Se encontró que el uso del vehículo eléctrico reduciría hasta en un 164,28 % las emisiones anuales de CO₂, según las estimaciones para el año 2020; y hasta en un 465,10 %; según las proyecciones para el año 2030.

Se evaluó el **desempeño a largo plazo** de las dos alternativas, encontrándose que, con el uso del vehículo eléctrico, los gastos acumulados (en un período de ocho años) se reducirán hasta en un 16,41 %; y las emisiones (en el período 2019 - 2030), hasta en un 227,38 %.

Se elaboró una **matriz multicriterio** para facilitar la toma de decisiones en los procesos de gestión ecológica en una empresa de transporte. La matriz valora diferentes factores relevantes que inciden en las decisiones, y permite realizar un cálculo con base en las ponderaciones y calificaciones obtenidas.

Se estudió la importancia de **implementar regulaciones y normativas vinculantes**, a nivel local, regional e internacional, que incentiven la reducción de emisiones; concluyéndose que los países que implementan este tipo de regulaciones, y trabajan en proyectos para la reducción de emisiones, obtienen resultados más positivos y avanzan con mayor facilidad en el proceso de reducir el nivel de emisiones en su entorno.

Se analizó el **impacto ambiental y social** asociado a los diferentes medios para la generación de energía eléctrica. Se estudiaron las estrategias para reducir este impacto, especialmente la participación de las comunidades afectadas en los procesos de toma de decisiones e implementación de proyectos, y la promoción del uso de alternativas ecológicas para la generación de energía eléctrica, como parques eólicos y solares, aprovechamiento de la energía geotérmica o mareomotriz.

7.2. Limitaciones encontradas y líneas futuras de desarrollo

7.2.1. Limitaciones

Durante el desarrollo de este estudio, se encontraron las siguientes limitaciones:

- Falta de datos reales de la operación de una empresa en particular, que permitieran realizar la validación de la metodología.
- Complejidad de la obtención de datos de los fabricantes, referentes al rendimiento de los modelos de vehículos, y los costes asociados a los mismos.
- Ausencia de datos sobre el desempeño real de los vehículos desarrollados más recientemente, ya que aún se encuentran en estado experimental.
- Falta de consistencia en los datos de las emisiones de dióxido de carbono, incluso para países pertenecientes a una misma zona geográfica.

7.2.2. Líneas futuras de desarrollo

A raíz de estas limitaciones, de los resultados obtenidos y de las conclusiones formuladas, se proponen los siguientes desarrollos a futuro:

- Aplicar la metodología diseñada en la gestión de la flota de una empresa del transporte de mercancías por carretera, con datos históricos proporcionados por la misma empresa. De este modo, se validaría la propuesta planteada en este estudio en condiciones reales y actualizadas.
- Validar la metodología desarrollada en otros entornos que empleen flotas de transporte, como vehículos de transporte urbano (autobuses, taxis, etc.), o vehículos de transporte de mercancías, en medios urbanos.
- Analizar en mayor profundidad las normativas existentes para controlar las emisiones del sector del transporte en una zona o región concreta, y estudiar el impacto que tiene la aplicación de dichas normativas en la cadena logística de las empresas de transporte de mercancías por carretera.

Referencias bibliográficas

- Ahmadi, L., Yip, A., Fowler, M., Young, S. B., & Fraser, R. A. (Junio de 2014). Environmental feasibility of re-use of electric vehicle batteries. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 6, 64-74. doi:10.1016/j.seta.2014.01.006
- Albuquerque, F. D., Maraqa, M. A., Chowdhury, R., Mauga, T., & Alzard, M. (2020). Greenhouse gas emissions associated with road transport projects: current status, benchmarking, and assessment tools. *Transportation Research Procedia*, 48, 2018-2030. doi:10.1016/j.trpro.2020.08.261
- Alcívar Valencia, N. E. (2016). *Evaluación del Impuesto Ambiental a la Contaminación Vehicular: análisis comparativo con otros países de América Latina*. Universidad Andina Simón Bolívar - Sede Ecuador, Área de Derecho - Programa de Maestría en Tributación. Quito: Universidad Andina Simón Bolívar - Sede Ecuador. Obtenido de <https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/5429/1/T2139-MT-Alcivar-Evaluacion.pdf>
- Automotive World. (15 de Marzo de 2016). *Autonomous Mobility News Releases*. Recuperado el 8 de Junio de 2021, de Kenworth T680s provide high mpg, low driver turnover for refrigerated carrier Hoosier Air: <https://www.automotiveworld.com/news-releases/kenworth-t680s-provide-high-mpg-low-driver-turnover-refrigerated-carrier-hoosier-air/>
- Bárcena, A., Samaniego, J., Peres, W., & Alatorre, J. E. (2020). *La emergencia del cambio climático en América Latina y el Caribe: ¿Seguimos esperando la catástrofe o pasamos a la acción?* Santiago: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Barnes, G., & Langworthy, P. (2003). *The per-mile costs of operating automobiles and trucks*. University of Minnesota, State and Local Policy Program - Humphrey Institute of Public Affairs. Minneapolis: Minnesota Department of Transportation - Office of Research Services.
- Berggren, C., & Magnusson, T. (Febrero de 2012). Reducing automotive emissions: The potentials of combustion engine technologies and the power of policy. *Energy Policy*, 41, 636-643. doi:10.1016/j.enpol.2011.11.025

- Berkun, M. (Diciembre de 2010). Hydroelectric potential and environmental effects of multidam hydropower projects in Turkey. *Energy for Sustainable Development*, 14(4), 320-329. doi:10.1016/j.esd.2010.09.003
- Bosteels, D., & Searles, R. A. (2002). Exhaust Emission Catalyst Technology. *Platinum Metals Review*, 46(1), 27-36.
- Brandt, E. P., Wang, Y., & Grizzle, J. W. (2002). Dynamic modeling of a three-way catalyst for SI engine exhaust emission control. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 8(5), 767-776. doi:10.1109/87.865850
- Bulk Transporter. (1 de Junio de 2012). *Freightliner Trucks unveils the Cascadia Evolution powered by Detroit*. Recuperado el 17 de Abril de 2021, de Fleet Management: <https://www.bulktransporter.com/fleet-management/tank-fleets/article/21654547/freightliner-trucks-unveils-the-cascadia-evolution-powered-by-detroit>
- Carbon Footprint Ltd. (2021). *Carbon Calculator*. Recuperado el 24 de Abril de 2021, de Carbon Footprint: <https://www.carbonfootprint.com/calculator.aspx>
- CEPAL. (2021). *Anuario Estadístico de América Latina y el Caribe 2020*. Obtenido de <https://statistics.cepal.org/yearbook/2020/>
- Cerna, F. V., Pourakbari-Kasmaei, M., Contreras, J., & Gallego, L. A. (Marzo de 2019). Optimal Selection of Navigation Modes of HEVs Considering CO₂ Emissions Reduction. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(3), 2196-2206. doi:10.1109/TVT.2019.2894383
- Chi, G., & Stone, B. (2005). Sustainable Transport Planning: Estimating the Ecological Footprint of Vehicle Travel in Future Years. *Journal of Urban Planning and Development*, 131(3), 170-180. doi:Chi, G., & Stone, B. (2005). Sustainable Transport Planning: Estimating the Ecological Footprint of Vehicle Travel in Future Years. Journ10.1061/(asce)0733-9488(2005)131:3(170)
- commercialfleet.org. (2021). *Carbon Footprint Calculator*. Recuperado el 13 de Abril de 2021, de Tools: <https://www.commercialfleet.org/tools/van/carbon-footprint-calculator>

- Cowan, K., Daim, T., & Anderson, T. (Diciembre de 2010). Exploring the impact of technology development and adoption for sustainable hydroelectric power and storage technologies in the Pacific Northwest United States. *Energy*, 35(12), 4771-4779. doi:10.1016/j.energy.2010.09.013
- de Lima, A., & dos Santos, M. A. (Diciembre de 2015). Hydroelectric plants environmental viability: Strategic environmental assessment application in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 1413-1423. doi:10.1016/j.rser.2015.07.152
- Dell, R. M., & Rand, D. A. (2004). *Clean Energy*. (J. H. Clark, Ed.) Londres: The Royal Society of Chemistry. doi:10.1039/9781847550552
- Descarries, É. (13 de Marzo de 2019). *Car News*. Recuperado el 8 de Junio de 2021, de The Lion8 : Canada's First All-Electric Truck Is Unveiled: <https://www.auto123.com/en/news/lion8-quebec-made-electric-truck-unveiled/65690/>
- Diabat, A., & Govindan, K. (2011). An analysis of the drivers affecting the implementation of green supply chain management. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(6), 659-667. doi:10.1016/j.resconrec.2010.12.002
- European Commission. (2020). *Stepping up Europe's 2030 climate ambition: Investing in a climate-neutral future for the benefit of our people*. European Commission. Brussels: European Commission.
- European Commission. (30 de Abril de 2021). *Electricity prices by type of user*. Recuperado el 3 de Mayo de 2021, de Data Browser: <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ten00117/default/table?lang=en>
- European Commission. (9 de Marzo de 2021). *Net earnings of a full-time single worker without children, 100% average wage – PPS*. Recuperado el 3 de Mayo de 2021, de Data Browser: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/tepsr_wc330/default/table?lang=en
- European Environment Agency. (2018). *Trends and projections in Europe 2018: tracking progress towards Europe's climate and energy targets*. Luxembourg: Publications Office of the European Union. doi:10.2800/931891

- European Environment Agency. (25 de Noviembre de 2020). *CO₂ emission intensity*. Recuperado el 24 de Abril de 2021, de Data visualizations: [https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/co2-emission-intensity-5#tab-googlechartid_chart_11_filters=%7B%22rowFilters%22%3A%7B%7D%3B%22columnFilters%22%3A%7B%22pre_config_uggeo%22%3A%5B%22European%20Union%20\(current%20composition\)%22%5D%7D%7D](https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/co2-emission-intensity-5#tab-googlechartid_chart_11_filters=%7B%22rowFilters%22%3A%7B%7D%3B%22columnFilters%22%3A%7B%22pre_config_uggeo%22%3A%5B%22European%20Union%20(current%20composition)%22%5D%7D%7D)
- European Environment Agency. (8 de Diciembre de 2020). *Greenhouse gas emission intensity of electricity generation*. Recuperado el 1 de Mayo de 2021, de Data Visualization: https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/co2-emission-intensity-6#tab-googlechartid_googlechartid_googlechartid_googlechartid_chart_11111
- European Environment Agency. (9 de Febrero de 2021). *Transport fuel prices and taxes in Europe*. Recuperado el 3 de Mayo de 2021, de Indicators: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/fuel-prices-and-taxes/assessment-4>
- Fahimnia, B., Sarkis, J., & Davarzani, H. (2015). Green supply chain management: A review and bibliometric analysis. *International Journal of Production Economics*, 162, 101-114. doi:10.1016/j.ijpe.2015.01.003
- Fearnside, P. M. (Marzo de 2001). Environmental Impacts of Brazil's Tucuruí Dam: Unlearned Lessons for Hydroelectric Development in Amazonia. *Environmental Management*, 27, 377–396. doi:10.1007/s002670010156
- Fearnside, P. M. (Abril de 2014). Impacts of Brazil's Madeira River Dams: Unlearned lessons for hydroelectric development in Amazonia. *Environmental Science & Policy*, 38, 164-172. doi:10.1016/j.envsci.2013.11.004
- Fearnside, P. M. (Enero de 2016). Environmental and Social Impacts of Hydroelectric Dams in Brazilian Amazonia: Implications for the Aluminum Industry. *World Development*, 77, 48-65. doi:10.1016/j.worlddev.2015.08.015
- Fearnside, P. M. (Enero de 2016). Greenhouse gas emissions from Brazil's Amazonian hydroelectric dams. *Environmental Research Letters*, 11, 1-3. doi:10.1088/1748-9326/11/1/011002

- Freightliner Trucks. (s.f.). *Cascadia*®. Recuperado el 17 de Abril de 2021, de Trucks: <https://freightliner.com/trucks/cascadia/>
- Fuglestvedt, J., Berntsen, T., Myhre, G., Rypdal, K., & Bieltvedt Skeie, R. (2008, Enero 15). Climate forcing from the transport sectors. (C. B. Field, Ed.) *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(2), 454-458. doi:10.1073/pnas.0702958104
- Gallagher, K. S., & Muehlegger, E. (Enero de 2011). Giving green to get green? Incentives and consumer adoption of hybrid vehicle technology. *Journal of Environmental Economics and Management*, 61(1), 1-15. doi:10.1016/j.jeem.2010.05.004
- García Bernal, N. (2018). *Implementación del Impuesto Verde en Chile*. Comisión de Minería y Energía del Senado, Asesoría Técnica Parlamentaria. Santiago: Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.
- Gómez Montoya, R. A., Correa Espinal, A. A., & Hernández Vahos, J. D. (27 de Enero de 2016). Transporte verde: eficiencia y reducción de CO₂ integrando gestión, tecnologías de información y comunicaciones (TIC) y un metaheurístico. *Producción + Limpia*, 10(2), 53-68.
- Green, K. W., Zelbst, P. J., Meacham, J., & Bhaduria, V. S. (2012). Green supply chain management practices: impact on performance. *Supply Chain Management: An International Journal*, 17(3), 290-305. doi:10.1108/13598541211227126
- Hanna, P., Vanclay, F., Langdon, E. J., & Arts, J. (1 de Junio de 2016). The importance of cultural aspects in impact assessment and project development: reflections from a case study of a hydroelectric dam in Brazil. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 34(4), 306-318. doi:10.1080/14615517.2016.1184501
- Hannan, M. A., Azidin, F. A., & Mohamed, A. (Enero de 2014). Hybrid electric vehicles and their challenges: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 135-150. doi:10.1016/j.rser.2013.08.097
- Harper, G., Sommerville, R., Kendrick, E., Driscoll, L., Slater, P., Stolkin, R., . . . Anderson, P. (Noviembre de 2019). Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature*, 575, 75-86. doi:10.1038/s41586-019-1682-5

- Herrán, C. (2012). *El cambio climático y sus consecuencias para América Latina*. Fundación Friedrich Ebert, Proyecto Energía y Clima. México: Fundación Friedrich Ebert. Recuperado el 30 de Marzo de 2021, de <https://library.fes.de/pdf-files/bueros/la-energiayclima/09164.pdf>
- Hervani, A. A., Helms, M. M., & Sarkis, J. (2005). Performance measurement for green supply chain management. *Benchmarking: An International Journal*, 12(4), 330-353. doi:10.1108/14635770510609015
- Hongtao, L., & Wenjia, L. (Octubre de 2018). The analysis of effects of clean energy power generation. *Energy Procedia*, 152, 947-952. doi:10.1016/j.egypro.2018.09.098
- Huisingh, D., Zhang, Z., Moore, J. C., Qiao, Q., & Li, Q. (15 de Septiembre de 2015). Recent advances in carbon emissions reduction: policies, technologies, monitoring, assessment and modeling. *Journal of Cleaner Production*, 103, 1-12. doi:10.1016/j.jclepro.2015.04.098
- International Energy Agency. (2016). *CO₂ emissions from fuel combustion by sector in 2014*. (IEA, Editor) Obtenido de CO₂ Emissions from Fuel Combustion - CO₂ Highlights 2016 - Excel tables: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/co2-emissions-from-fuel-combustion-highlights-2016.html>
- International Energy Agency. (2020). *European Union 2020: Energy Policy Review*. International Energy Agency, IEA Publications. France: International Energy Agency.
- Jiao, N., & Evans, S. (2016). Business Models for Sustainability: The Case of Second-life Electric Vehicle Batteries. *Procedia CIRP*, 40, 250-255. doi:10.1016/j.procir.2016.01.114
- Jiménez Herrero, L. M. (Marzo de 2011). *Cuadernos de la Fundación General CSIC*. Obtenido de Transporte y movilidad, claves para la sostenibilidad: http://www.fgcsic.es/lychnos/es_es/articulos/transporte_movilidad_claves_para_la_sostenibilidad
- Junta de Andalucía. (2007). *Manual para la Gestión Ambiental en el Sector Transporte en Andalucía*. Sevilla: Consejería de Medio Ambiente. Obtenido de https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/web/Bloques_Tematicos/Publicaciones_Divulgacion_Y_Noticias/Documentos_Tecnicos/manual_gestion_ambiental_sector_transporte/documento_completo.pdf

- Kenworth Sales Company. (2020). *Inventory*. Recuperado el 8 de Junio de 2021, de 2020 Kenworth T680 Tractors For Sale: <https://www.kenworthsalesco.com/2020-kenworth-t680-tractors-for-sale/>
- Kenworth Truck Company. (2021). *Trucks*. Recuperado el 8 de Junio de 2021, de Kenworth T680 Next Gen: <https://www.kenworth.com/trucks/t680-next-gen/>
- Klimpt, J.-É., Rivero, C., Puranen, H., & Koch, F. (Noviembre de 2002). Recommendations for sustainable hydroelectric development. *Energy Policy*, 30(14), 1305-1312. doi:10.1016/S0301-4215(02)00092-7
- Kummer, J. T. (1980). Catalysts for Automotive Emission Control. *Progress in Energy and Combustion Science*, 6(2), 177-199. doi:10.1016/0360-1285(80)90006-4
- Larminie, J., & Lowry, J. (2012). *Electric Vehicle Technology Explained* (2nd ed.). Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.
- Lu, S., & Liu, Y. (27 de Febrero de 2018). Evaluation system for the sustainable development of urban transportation and ecological environment based on SVM. (M. Sundhararajan, X.-Z. Gao, & H. V. Nejad, Edits.) *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 34(2), 831-838. doi:10.3233/JIFS-169376
- Lutsey, N. (2010). *Review of Technical Literature and Trends Related to Automobile Mass-Reduction Technology*. University of California, Davis, Institute of Transportation Studies. Davis: Institute of Transportation Studies.
- Maggeto, G., & van Mierlo, J. (2000). Electric and electric hybrid vehicle technology: a survey. *IEEE Seminar on Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles*. Durham: IET. doi:10.1049/ic:20000261
- Maji, I. K. (Noviembre de 2015). Does clean energy contribute to economic growth? Evidence from Nigeria. *Energy Reports*, 1, 145-150. doi:10.1016/j.egy.2015.06.001
- Martín, L. (26 de Agosto de 2019). *Compromiso Empresarial*. Obtenido de La logística se alía con el medio ambiente para evolucionar: <https://www.compromisoempresarial.com/rsc/2019/08/la-logistica-se-alia-con-el-medio-ambiente-para-evolucionar/>

- Masuda, K., Tsujimura, K., Shinoda, K., & Kato, T. (1996). Silver-promoted catalyst for removal of nitrogen oxides from emission of diesel engines. *Applied Catalysis B: Environmental*, 8(1), 33-40. doi:10.1016/0926-3373(95)00051-8
- Matthias, V., Bieser, J., Mocanu, T., Pregger, T., Quante, M., Ramacher, M. O., . . . Winkler, C. (2020). Modelling road transport emissions in Germany – Current day situation and scenarios for 2040. *Transportation Research Part D*, 87. doi:10.1016/j.trd.2020.102536
- Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. (2018). *Transporte Terrestre*. Obtenido de ACOTRAM 3.1.0: <https://www.mitma.gob.es/transporte-terrestre/servicios-al-transportista/descarga-de-programas/acotram-300>
- Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. (Enero de 2021). *Observatorio de costes del transporte de mercancías*. Recuperado el 3 de Mayo de 2021, de Actividades y Servicios - Observatorios: <https://www.mitma.gob.es/transporte-terrestre/servicios-al-transportista/observatorios-del-transporte/observatorios-del-transporte-de-mercancias-por-carretera/observatorios-costes-transporte-mercancias>
- Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. (2021). *Observatorio de Costes del Transporte de Mercancías por Carretera*. Dirección General de Transporte Terrestre, Secretaría de Estado de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Madrid: Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Recuperado el 4 de Abril de 2021, de https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/listado/recursos/observatorio_de_costes_enero_2021.pdf
- Ministerio del Medio Ambiente. (2011). *Segunda comunicación nacional de Chile ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático*. Santiago: Comisión Nacional del Medio Ambiente.
- Ministry of Finance. (2000). *Economic survey 1999/2000*. New Delhi: Tata Energy Research Institute.
- Navarra, D., & van der Molen, P. (4 de Febrero de 2014). A global perspective on cadastres and Geo-ICT for sustainable urban governance in view of climate change. *ACE: Architecture, City and Environment*, 8(24), 59-72. doi:10.5821/ace.8.24.2716
- Nguyen, H. T., Pham, T. H., & de Bruyn, L. L. (11 de Agosto de 2017). Impact of Hydroelectric Dam Development and Resettlement on the Natural and Social Capital of Rural

Livelihoods in Bo Hon Village in Central Vietnam. *Sustainability*, 9(8), 1422-1437.
doi:10.3390/su9081422

O'Dell, J. (5 de Septiembre de 2019). *Here's Everything We Know About the Tesla Semi*. Recuperado el 16 de Abril de 2021, de Trucks.com: <https://www.trucks.com/2019/09/05/everything-we-know-about-the-tesla-semi-truck/>

Organización de las Naciones Unidas. (1998). *Protocolo de Kyoto*. Organización de las Naciones Unidas, Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Kioto: Organización de las Naciones Unidas.

Organización de las Naciones Unidas. (2015). Los sistemas sostenibles de transporte de mercancías: oportunidades para los países en desarrollo. *Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo* (págs. 1-27). Ginebra: Junta de Comercio y Desarrollo. Obtenido de https://unctad.org/system/files/official-document/cimem7d11_es.pdf

Organización de las Naciones Unidas. (2017). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Obtenido de ¿Qué es el Acuerdo de París?: <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-paris-agreement/que-es-el-acuerdo-de-paris>

Organización de las Naciones Unidas. (2021). *¿Qué es el Protocolo de Kyoto?* Recuperado el 30 de Marzo de 2021, de Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático: https://unfccc.int/es/kyoto_protocol

Parlamento Europeo. (2019). *Reglamento (UE) 2019/1242 del Parlamento Europeo y del Consejo*. Unión Europea. Obtenido de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1242&from=EN>

Parlamento Europeo. (2019). *Reglamento (UE) 2019/631 del Parlamento Europeo y del Consejo*. Unión Europea. Obtenido de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0631&from=EN>

Pike, E. (2012). *Calculating Electric Drive Vehicle Greenhouse Gas Emissions*. The International Council on Clean Transportation. Washington D.C.: The International Council on Clean Transportation.

- Pimentel, G. D. (Marzo de 2021). Powering corporate citizenship: assessing corporate social responsibility of hydroelectric companies in Canada. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 39(2), 127-137. doi:10.1080/14615517.2021.1893927
- Presidencia de la República. (2016). *Reglamento para el control de las emisiones contaminantes producidas por los vehículos automotores con motor de combustión interna*. San José: Presidencia de la República. Recuperado el 30 de Marzo de 2021, de <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/cos162852.pdf>
- Ritchie, H. (6 de Octubre de 2020). *Our World in Data*. Recuperado el 27 de Marzo de 2021, de Cars, planes, trains: where do CO₂ emissions from transport come from?: <https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-transport>
- Rogers, E. M. (1995). *Diffusion of Innovation* (3rd ed.). New York: Free Press.
- Romm, J. (Noviembre de 2006). The car and fuel of the future. *Energy Policy*, 34(17), 2609-2614. doi:10.1016/j.enpol.2005.06.025
- Rosenberg, D. M., Berkes, F., Bodaly, R. A., Hecky, R. E., Kelly, C. A., & Rudd, J. W. (Marzo de 1997). Large-scale impacts of hydroelectric development. *Environmental Reviews*, 5(1), 27-54. doi:10.1139/er-5-1-27
- Rosenberg, D. M., Bodaly, R. A., & Usher, P. J. (1995). Environmental and social impacts of large scale hydro-electric development: who is listening? *Global Environmental Change*, 5(2), 127-148. doi:10.1016/0959-3780(95)00018-J
- Santos, G. (2017). Road transport and CO₂ emissions: What are the challenges? *Transport Policy*, 59, 71-74. doi:10.1016/j.tranpol.2017.06.007
- Sbihi, A., & Eglese, R. W. (2011). *The relationship between vehicle routing and scheduling and green logistics: a literature survey*. Lancaster University, The Department of Management Science. Lancaster: Lancaster University. Recuperado el 2 de Abril de 2021, de <https://eprints.lancs.ac.uk/id/eprint/48900/>
- Shan, W., Liu, F., Yu, Y., He, H., Deng, C., & Zi, X. (10 de Enero de 2015). High-efficiency reduction of NO_x emission from diesel exhaust using a CeWO_x catalyst. *Catalysis Communications*, 59, 226-228. doi:10.1016/j.catcom.2014.10.032

- Sims, R., Schaeffer, R., Creutzig, F., Cruz-Núñez, X., D'Agosto, M., Dimitriu, D., . . . Tiwari, G. (2014). Transport. En O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, . . . J. C. Minx (Edits.), *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (págs. 599-670). Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.
- Singh, A., Ganpopadhyay, S., Nanda, P. K., Bhattacharya, S., Sharma, C., & Bhan, C. (2008, Febrero 1). Trends of greenhouse gas emissions from the road transport sector in India. *Science of The Total Environment*, 390, 124-131. doi:10.1016/j.scitotenv.2007.09.027
- Sönnichsen, N. (2 de Octubre de 2020). *Industry electricity prices in the European Union 2019, by country* . Recuperado el 19 de Abril de 2021, de Statista: <https://www.statista.com/statistics/1046605/industry-electricity-prices-european-union-country/>
- Srivastava, S. K. (2007). Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review. *International Journal of Management Reviews*, 9(1), 53-80. doi:10.1111/j.1468-2370.2007.00202.x
- Takeshita, T. (2011). Global Scenarios of Air Pollutant Emissions from Road Transport through to 2050. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 8(7), 3032-3062. doi:10.3390/ijerph8073032
- Tesla Inc. (16 de Noviembre de 2017). *@Tesla*. Recuperado el 16 de Abril de 2021, de <https://twitter.com/Tesla/status/931384635946184704>
- Tesla Inc. (16 de Noviembre de 2017). *Tesla Semi & Roadster Unveil*. Recuperado el 16 de Abril de 2021, de Tesla Semi: <https://www.tesla.com/semi>
- Tesla, Inc. (2021). *Tesla Semi*. Recuperado el 16 de Abril de 2021, de Tesla: Electric Cars, Solar & Clean Energy: <https://www.tesla.com/semi>
- The Lion Electric Company. (s.f.). Recuperado el 8 de Junio de 2021, de Lion8T - Technical Specifications: https://thelionelectric.com/documents/en/Lion8_all_applications.pdf
- The Lion Electric Company. (s.f.). Recuperado el 8 de Junio de 2021, de Lion8 – Tractor: <https://pages.thelionelectric.com/all-electric-lion8-tractor-truck-lion-electric/>

- The Nature Conservancy. (2021). *Calculate Your Carbon Footprint*. Recuperado el 9 de Mayo de 2021, de The Nature Conservancy: <https://www.nature.org/en-us/get-involved/how-to-help/carbon-footprint-calculator/>
- Truck Locator. (2021). *2020 Freightliner Cascadia*. Recuperado el 17 de Abril de 2021, de <https://www.trucklocator.co.uk/listings/trucks/for-sale/28303929/2020-freightliner-cascadia-126>
- Truck Paper. (s.f.). *Trucks for sale*. Recuperado el 8 de Junio de 2021, de New KENWORTH T680 Trucks For Sale: <https://www.truckpaper.com/listings/trucks/for-sale/list/manufacture/kenworth/model-group/t680?Cond=New>
- Tseng, M.-L., Islam, M. S., Karia, N., & Fauzi, F. A. (2019). A literature review on green supply chain management: Trends and future challenges. *Resources, Conservation & Recycling*, 141, 145-162. doi:10.1016/j.resconrec.2018.10.009
- U.S. Energy Information Administration. (2019). *How much carbon dioxide is produced per kilowatthour of U.S. electricity generation?* Recuperado el 24 de Abril de 2021, de Frequently Asked Questions (FAQs): <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=74&t=11>
- United Nations. (2016). *Adoption of the Paris Agreement*. París: United Nations Framework Convention on Climate Change.
- United States Environmental Protection Agency. (1990). *Clean Air Act Text*. United States Environmental Protection Agency. United States Environmental Protection Agency. Obtenido de <https://www.epa.gov/clean-air-act-overview/clean-air-act-text>
- United States Environmental Protection Agency. (2007). *The Plain English Guide to the Clean Air Act*. United States Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards. Raleigh: United States Environmental Protection Agency.
- United States Environmental Protection Agency. (2018). *Greenhouse Gases Equivalencies Calculator - Calculations and References*. United States Environmental Protection Agency. Washington D.C.: United States Environmental Protection Agency.

- United States Environmental Protection Agency. (4 de Diciembre de 2020). *Air Enforcement*. Recuperado el 30 de Marzo de 2021, de United States Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/enforcement/air-enforcement>
- Verduzco, B., & Sánchez, A. (2008). Planning hydroelectric power plants with the public: a case of organizational and social learning in Mexico. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 26(3), 163-176. doi:10.3152/146155108X363052
- Vestreng, V., Ntziachristos, L., Semb, A., Reis, S., Isaksen, I. S., & Tarrasón, L. (2009). Evolution of NOx emissions in Europe with focus on road transport control measures. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 1503-1520.
- Wei, M., Patadia, S., & Kammen, D. M. (Febrero de 2010). Putting renewables and energy efficiency to work: How many jobs can the clean energy industry generate in the US? *Energy Policy*, 38(2), 919-931. doi:10.1016/j.enpol.2009.10.044
- World Bank. (2002). *India's transport sector: the challenges ahead*. New Delhi: The World Bank.
- World Bank. (2016). *CO₂ emissions (metric tons per capita)*. Obtenido de Carbon Dioxide Information Analysis Center: <https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.PC>
- World Bank. (2019). *Inflation, consumer prices*. Recuperado el 16 de Abril de 2021, de Data: <https://data.worldbank.org/indicator/FP.CPI.TOTL.ZG>
- Zanotti, L. (15 de Septiembre de 2015). Water and life: hydroelectric development and indigenous pathways to justice in the Brazilian Amazon. *Politics, Groups, and Identities*, 3(4), 666-672. doi:10.1080/21565503.2015.1080621
- Zhu, Q., Sarkis, J., & Lai, K.-h. (2012). Green supply chain management innovation diffusion and its relationship to organizational improvement: An ecological modernization perspective. *Journal of Engineering and Technology Management*, 29(1), 168-185. doi:10.1016/j.jengtecman.2011.09.012

Anexo A. Datos de los indicadores de emisiones globales

Tabla 16. Emisiones de gases de efecto invernadero por modo de transporte

	Sector	Porcentaje (%)	Valor (en Gt. CO₂ eq.)
Emisiones directas	Carretera	72,06	5,04
	Ferrocarril	1,60	0,11
	Tubería	2,38	0,17
	Otros gases	2,16	0,15
	Aviación internacional	6,52	0,46
	Aviación nacional	4,10	0,29
	Navegación internacional	9,26	0,65
	Navegación nacional	1,91	0,13
TOTAL		100	7,0
Emisiones indirectas		2,11	0,15

Sims et al. (2014, pág. 606)

Tabla 17. Variación de la temperatura media anual en Latinoamérica y el Caribe

Año	Variación de temperatura anual (°C)		
	América Central	América del Sur	El Caribe
1961	-0,14	0,12	0,00
1962	0,11	-0,14	-0,03
1963	0,15	0,14	-0,09
1964	-0,26	-0,22	0,11
1965	-0,08	-0,02	-0,14

1966	-0,20	0,01	-0,18
1967	-0,15	0,00	-0,24
1968	-0,40	-0,15	-0,28
1969	0,20	0,37	0,12
1970	-0,26	0,18	-0,24
1971	-0,10	-0,28	-0,13
1972	0,30	0,09	0,18
1973	-0,04	0,25	0,34
1974	-0,13	-0,21	-0,14
1975	-0,25	-0,15	0,25
1976	-0,41	-0,22	-0,32
1977	0,09	0,29	0,16
1978	0,21	0,15	0,10
1979	0,04	0,13	0,20
1980	0,44	0,34	0,51
1981	0,17	0,23	0,19
1982	0,58	0,29	0,42
1983	0,19	0,48	0,39
1984	-0,05	0,14	0,21
1985	0,10	0,14	0,12
1986	0,27	0,30	0,24
1987	-0,01	0,65	0,69
1988	0,21	0,30	0,57
1989	0,40	0,20	0,45

1990	0,27	0,39	0,68
1991	0,31	0,41	0,66
1992	0,15	0,30	0,49
1993	0,33	0,40	0,47
1994	0,69	0,54	0,89
1995	0,77	0,64	0,91
1996	0,46	0,42	0,50
1997	0,54	0,74	0,96
1998	0,78	1,02	1,21
1999	0,54	0,39	0,79
2000	0,52	0,31	0,56
2001	0,52	0,62	0,57
2002	0,69	0,84	0,91
2003	0,82	0,86	1,09
2004	0,36	0,74	0,78
2005	0,76	0,88	0,73
2006	0,81	0,79	0,87
2007	0,53	0,67	0,96
2008	0,52	0,67	0,53
2009	1,03	0,93	0,66
2010	0,39	0,91	0,87
2011	0,94	0,72	0,54
2012	0,83	0,94	0,65
2013	0,77	0,83	0,87

2014	0,82	1,11	0,99
2015	1,09	1,44	1,23
2016	1,28	1,24	1,23
2017	1,43	1,23	1,22
2018	1,12	1,03	1,13
2019	1,31	1,31	1,47

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (2021)

Tabla 18. Emisiones de CO₂ en los países de Latinoamérica y el Caribe en el año 2016

País	CO₂ per cápita 2016 (toneladas métricas)
Antigua y Barbuda	5,8966
Argentina	4,6191
Bahamas	4,7253
Barbados	4,4651
Belice	1,5428
Bolivia (Estado Plurinacional de)	1,9585
Brasil	2,2424
Chile	4,7132
Colombia	2,0304
Costa Rica	1,6376
Cuba	2,4952
Dominica	2,5199
República Dominicana	2,4292
Ecuador	2,4956

El Salvador	1,1279
Guyana	3,0900
Haití	0,2747
Honduras	1,0585
Jamaica	2,8301
México	3,9438
Nicaragua	0,8871
Panamá	2,6541
Paraguay	1,0929
Perú	1,8565
Saint Kitts y Nevis	4,6167
Santa Lucía	2,3018
San Vicente y las Granadinas	2,0101
Suriname	3,0770
Trinidad y Tobago	31,8449
Uruguay	1,9759
Venezuela (República Bolivariana de)	5,5007
América Latina y el Caribe	3,6746
Promedio global	4,5552

Banco Mundial (2016)

Anexo B. Condiciones para la validación

Tabla 19. Coste de la electricidad en Europa

País	Coste (en centavos de euro)
Alemania	9,04
Austria	8,36
Bélgica	8,1
Bulgaria	7,51
Chipre	15,28
Croacia	8,32
Dinamarca	6,12
Eslovaquia	11,06
Eslovenia	11,06
España	8,64
Estonia	7,57
Finlandia	5,67
Francia	7,17
Grecia	8,33
Hungría	8,21
Irlanda	10,07
Italia	11,66
Letonia	7,85
Lituania	7,56
Luxemburgo	4,46

Malta	9,24
Países Bajos	7,08
Polonia	8,57
Portugal	8,92
Reino Unido	13,24
República Checa	7,38
Rumanía	8,55
Suecia	5,27
Promedio Europa	8,58

Valores aplicables a un consumo de entre 500 MWh y 2.000 MWh.

Sönnichsen (2020)

Anexo C. Variación de la operación a largo plazo

Tabla 20. Inflación anual

Año	Unión Europea (%)	España (%)
2009	0,8392	-0,2879
2010	1,5311	1,7998
2011	3,2894	3,1961
2012	2,6628	2,4460
2013	1,2200	1,4085
2014	0,1993	-0,1508
2015	-0,0616	-0,5004
2016	0,1833	-0,2026
2017	1,4291	1,9560
2018	1,7386	1,6750
2019	1,6305	0,6995
Promedio	1,3329	1,0945

Banco Mundial (2019)

Tabla 21. Salario neto promedio

Año	Unión Europea		España	
	Valor (€)	Variación (%)	Valor (€)	Variación (%)
2013	20.600,89	N/A	20.595,33	N/A
2014	20.939,63	1,62	20.946,81	1,68
2015	21.070,25	0,62	21.971,68	4,66
2016	21.384,41	1,47	21.832,22	-0,64
2017	21.797,30	1,89	22.106,48	1,24
2018	22.381,70	2,61	21.975,97	-0,59
2019	23.034,27	2,83	22.309,34	1,49
2020	23.521,98	2,07	22.059,53	-1,13
Promedio	-	1,87	-	0,96

Comisión Europea - Oficina de Estadísticas (2021)

Tabla 22. Impuestos vehiculares

	España	
Año	Valor (€)	Variación (%)
2017	756,82	N/A
2018	774,24	2,25
2019	775,01	0,10
2020	768,80	-0,81
Promedio	-	0,51

Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (2021)

Tabla 23. Coste del combustible diésel

Año	Unión Europea		España	
	Valor (€/litro)	Variación (%)	Valor (€/litro)	Variación (%)
2010	1,14448	N/A	1,0745320	N/A
2011	1,34509	14,91	1,2668980	15,18
2012	1,46297	8,06	1,3663665	7,28
2013	1,42020	-3,01	1,3585480	-0,58
2014	1,36709	-3,88	1,3109222	-3,63
2015	1,19247	-14,64	1,1203361	-17,01
2016	1,09514	-8,89	1,0119598	-10,71
2017	1,19103	8,05	1,0995724	7,97
2018	1,31795	9,63	1,2061668	8,84
2019	1,31407	-0,30	1,2411265	2,82
2020	1,15745	-13,53	1,0749135	-15,46
2021	1,25979	8,12	1,1474650	6,32
Promedio	-	0,41	-	0,09

Agencia Europea del Ambiente (2021)

Tabla 24. Coste de la energía eléctrica

Año	Unión Europea		España	
	Valor (€/kWh)	Variación (%)	Valor (€/kWh)	Variación (%)
2010	0,0880	N/A	0,1110	N/A
2011	0,0925	4,86	0,1082	-2,59
2012	0,0943	1,91	0,1155	6,32
2013	0,0920	-2,50	0,1165	0,86
2014	0,0886	-3,84	0,1185	1,69
2015	0,0842	-5,23	0,1116	-6,18
2016	0,0793	-6,18	0,1051	-6,18
2017	0,0767	-3,39	0,1010	-4,06
2018	0,0779	1,54	0,1008	-0,20
2019	0,0842	7,48	0,0925	-8,97
2020	0,0818	-2,93	0,0786	-17,68
Promedio	-	-0,83	-	-3,70

Comisión Europea - Oficina de Estadísticas (2021)

Tabla 25. Variación anual del factor de emisiones

Año	Factor de Emisiones (kg CO ₂ /kWh)	
	España	Unión Europea
2019	0,2070	0,2750
2020	0,1997	0,2588
2021	0,1925	0,2426
2022	0,1852	0,2264
2023	0,1780	0,2102
2024	0,1707	0,1940
2025	0,1635	0,1778
2026	0,1562	0,1616
2027	0,1490	0,1454
2028	0,1417	0,1292
2029	0,1345	0,1130
2030	0,1272	0,0968

Elaboración propia con base en (European Environment Agency, 2020)

Anexo D. Variación acumulada de los factores de operación

Tabla 26. Costes a largo plazo del Freightliner Cascadia® para el contexto español

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8
Personal de conducción	30.100,00 €	30.388,96 €	30.680,69 €	30.975,23 €	31.272,59 €	31.572,81 €	31.875,91 €	32.181,92 €
Seguros	6.079,37 €	6.145,64 €	6.212,62 €	6.280,34 €	6.348,80 €	6.418,00 €	6.487,95 €	6.558,67 €
Costes fiscales	768,80 €	772,72 €	776,66 €	780,62 €	784,60 €	788,61 €	792,63 €	796,67 €
Mantenimiento y reparaciones	5.400,00 €	5.458,86 €	5.518,36 €	5.578,51 €	5.639,32 €	5.700,79 €	5.762,92 €	5.825,74 €
Dietas del conductor	12.697,70 €	12.819,60 €	12.942,67 €	13.066,92 €	13.192,36 €	13.319,00 €	13.446,87 €	13.575,96 €
Peajes	1.617,77 €	1.635,40 €	1.653,23 €	1.671,25 €	1.689,47 €	1.707,88 €	1.726,50 €	1.745,32 €
Amortización	14.609,08 €	14.609,08 €	14.609,08 €	14.609,08 €	14.609,08 €	14.609,08 €	14.609,08 €	14.609,08 €
Financiación	2.544,81 €	2.544,81 €	2.544,81 €	2.544,81 €	2.544,81 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Combustible	20.499,48 €	20.517,93 €	20.536,40 €	20.554,88 €	20.573,38 €	20.591,89 €	20.610,43 €	20.628,98 €
Disolución de urea	1.453,87 €	1.469,72 €	1.485,74 €	1.501,93 €	1.518,30 €	1.534,85 €	1.551,58 €	1.568,49 €
Neumáticos	8.418,23 €	8.509,99 €	8.602,75 €	8.696,52 €	8.791,31 €	8.887,13 €	8.984,00 €	9.081,93 €
Costes indirectos	6.251,35 €	6.292,36 €	6.333,78 €	6.375,61 €	6.417,84 €	6.307,80 €	6.350,87 €	6.394,37 €
Total	110.440,46 €	111.165,07 €	111.896,79 €	112.635,69 €	113.381,85 €	111.437,85 €	112.198,74 €	112.967,12 €
Total Acumulado	896.123,56 €							

(Elaboración propia)

Tabla 27. Costes a largo plazo del Freightliner Cascadia® para el contexto europeo

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8
Personal de conducción	30.100,00 €	30.662,87 €	31.236,27 €	31.820,38 €	32.415,43 €	33.021,59 €	33.639,10 €	34.268,15 €
Seguros	6.079,37 €	6.160,23 €	6.242,16 €	6.325,18 €	6.409,30 €	6.494,55 €	6.580,92 €	6.668,45 €
Costes fiscales	768,80 €	772,72 €	776,66 €	780,62 €	784,60 €	788,61 €	792,63 €	796,67 €
Mantenimiento y reparaciones	5.400,00 €	5.471,82 €	5.544,60 €	5.618,34 €	5.693,06 €	5.768,78 €	5.845,50 €	5.923,25 €
Dietas del conductor	12.697,70 €	12.935,15 €	13.177,03 €	13.423,44 €	13.674,46 €	13.930,18 €	14.190,67 €	14.456,04 €
Peajes	1.617,77 €	1.639,29 €	1.661,09 €	1.683,18 €	1.705,57 €	1.728,25 €	1.751,24 €	1.774,53 €
Amortización	14.609,08 €	14.609,08 €	14.609,08 €	14.609,08 €	14.609,08 €	14.609,08 €	14.609,08 €	14.609,08 €
Financiación	2.544,81 €	2.544,81 €	2.544,81 €	2.544,81 €	2.544,81 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Combustible	20.499,48 €	20.583,53 €	20.667,92 €	20.752,66 €	20.837,74 €	20.923,18 €	21.008,96 €	21.095,10 €
Disolución de urea	1.453,87 €	1.473,21 €	1.492,80 €	1.512,65 €	1.532,77 €	1.553,16 €	1.573,82 €	1.594,75 €
Neumáticos	8.418,23 €	8.530,19 €	8.643,64 €	8.758,60 €	8.875,09 €	8.993,13 €	9.112,74 €	9.233,94 €
Costes indirectos	6.251,35 €	6.322,97 €	6.395,76 €	6.469,74 €	6.544,92 €	6.628,63 €	6.708,28 €	6.793,20 €
Total	110.440,46 €	111.705,86 €	112.991,82 €	114.298,69 €	115.626,84 €	114.279,13 €	115.650,94 €	117.045,15 €
Total Acumulado	912.038,89 €							

(Elaboración propia)

Tabla 28. Costes a largo plazo del Kenworth T680 Next Gen® para el contexto español

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8
Personal de conducción	30.100,00 €	30.388,96 €	30.680,69 €	30.975,23 €	31.272,59 €	31.572,81 €	31.875,91 €	32.181,92 €
Seguros	6.079,37 €	6.145,64 €	6.212,62 €	6.280,34 €	6.348,80 €	6.418,00 €	6.487,95 €	6.558,67 €
Costes fiscales	768,80 €	772,72 €	776,66 €	780,62 €	784,60 €	788,61 €	792,63 €	796,67 €
Mantenimiento y reparaciones	5.400,00 €	5.458,86 €	5.518,36 €	5.578,51 €	5.639,32 €	5.700,79 €	5.762,92 €	5.825,74 €
Dietas del conductor	12.697,70 €	12.819,60 €	12.942,67 €	13.066,92 €	13.192,36 €	13.319,00 €	13.446,87 €	13.575,96 €
Peajes	1.617,77 €	1.635,40 €	1.653,23 €	1.671,25 €	1.689,47 €	1.707,88 €	1.726,50 €	1.745,32 €
Amortización	13.938,48 €	13.938,48 €	13.938,48 €	13.938,48 €	13.938,48 €	13.938,48 €	13.938,48 €	13.938,48 €
Financiación	2.438,15 €	2.438,15 €	2.438,15 €	2.438,15 €	2.438,15 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Combustible	21.147,69 €	21.166,72 €	21.185,77 €	21.204,84 €	21.223,92 €	21.243,03 €	21.262,14 €	21.281,28 €
Disolución de urea	1.453,87 €	1.469,72 €	1.485,74 €	1.501,93 €	1.518,30 €	1.534,85 €	1.551,58 €	1.568,49 €
Neumáticos	8.418,23 €	8.509,99 €	8.602,75 €	8.696,52 €	8.791,31 €	8.887,13 €	8.984,00 €	9.081,93 €
Costes indirectos	6.243,60 €	6.284,65 €	6.326,11 €	6.367,97 €	6.410,24 €	6.306,63 €	6.349,74 €	6.393,27 €
Total	110.303,66 €	111.028,89 €	111.761,23 €	112.500,76 €	113.247,54 €	111.417,21 €	112.178,73 €	112.947,72 €
Total Acumulado	895.385,74 €							

(Elaboración propia)

Tabla 29. Costes a largo plazo del Kenworth T680 Next Gen® para el contexto europeo

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8
Personal de conducción	30.100,00 €	30.662,87 €	31.236,27 €	31.820,38 €	32.415,43 €	33.021,59 €	33.639,10 €	34.268,15 €
Seguros	6.079,37 €	6.160,23 €	6.242,16 €	6.325,18 €	6.409,30 €	6.494,55 €	6.580,92 €	6.668,45 €
Costes fiscales	768,80 €	772,72 €	776,66 €	780,62 €	784,60 €	788,61 €	792,63 €	796,67 €
Mantenimiento y reparaciones	5.400,00 €	5.471,82 €	5.544,60 €	5.618,34 €	5.693,06 €	5.768,78 €	5.845,50 €	5.923,25 €
Dietas del conductor	12.697,70 €	12.935,15 €	13.177,03 €	13.423,44 €	13.674,46 €	13.930,18 €	14.190,67 €	14.456,04 €
Peajes	1.617,77 €	1.639,29 €	1.661,09 €	1.683,18 €	1.705,57 €	1.728,25 €	1.751,24 €	1.774,53 €
Amortización	13.938,48 €	13.938,48 €	13.938,48 €	13.938,48 €	13.938,48 €	13.938,48 €	13.938,48 €	13.938,48 €
Financiación	2.438,15 €	2.438,15 €	2.438,15 €	2.438,15 €	2.438,15 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Combustible	21.147,69 €	21.234,40 €	21.321,46 €	21.408,87 €	21.496,65 €	21.584,79 €	21.673,28 €	21.762,15 €
Disolución de urea	1.453,87 €	1.473,21 €	1.492,80 €	1.512,65 €	1.532,77 €	1.553,16 €	1.573,82 €	1.594,75 €
Neumáticos	8.418,23 €	8.530,19 €	8.643,64 €	8.758,60 €	8.875,09 €	8.993,13 €	9.112,74 €	9.233,94 €
Costes indirectos	6.243,60 €	6.315,39 €	6.388,34 €	6.462,47 €	6.537,81 €	6.618,09 €	6.698,90 €	6.779,98 €
Total	110.303,66 €	111.571,88 €	112.860,67 €	114.170,39 €	115.501,39 €	114.269,60 €	115.644,28 €	117.041,38 €
Total Acumulado	911.363,26 €							

(Elaboración propia)

Tabla 30. Costes a largo plazo del Tesla Semi® para el contexto español

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8
Personal de conducción	30.100,00 €	30.388,96 €	30.680,69 €	30.975,23 €	31.272,59 €	31.572,81 €	31.875,91 €	32.181,92 €
Seguros	6.079,37 €	6.145,64 €	6.212,62 €	6.280,34 €	6.348,80 €	6.418,00 €	6.487,95 €	6.558,67 €
Costes fiscales	768,80 €	772,72 €	776,66 €	780,62 €	784,60 €	788,61 €	792,63 €	796,67 €
Mantenimiento y reparaciones	5.400,00 €	5.458,86 €	5.518,36 €	5.578,51 €	5.639,32 €	5.700,79 €	5.762,92 €	5.825,74 €
Dietas del conductor	12.697,70 €	12.819,60 €	12.942,67 €	13.066,92 €	13.192,36 €	13.319,00 €	13.446,87 €	13.575,96 €
Peajes	1.617,77 €	1.635,40 €	1.653,23 €	1.671,25 €	1.689,47 €	1.707,88 €	1.726,50 €	1.745,32 €
Amortización	14.039,56 €	14.039,56 €	14.039,56 €	14.039,56 €	14.039,56 €	14.039,56 €	14.039,56 €	14.039,56 €
Financiación	2.385,76 €	2.385,76 €	2.385,76 €	2.385,76 €	2.385,76 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Energía Eléctrica	10.725,00 €	10.328,18 €	9.946,03 €	9.578,03 €	9.223,64 €	8.882,37 €	8.553,72 €	8.237,23 €
Neumáticos	6.887,64 €	6.962,72 €	7.038,61 €	7.115,33 €	7.192,89 €	7.271,29 €	7.350,55 €	7.430,67 €
Costes indirectos	5.442,10 €	5.456,24 €	5.471,65 €	5.488,29 €	5.506,14 €	5.382,02 €	5.402,20 €	5.423,50 €
Total	96.143,70 €	96.393,63 €	96.665,85 €	96.959,84 €	97.275,12 €	95.082,32 €	95.438,80 €	95.815,23 €
Total Acumulado	769.774,49 €							

(Elaboración propia)

Tabla 31. Costes a largo plazo del Tesla Semi® para el contexto europeo

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8
Personal de conducción	30.100,00 €	30.662,87 €	31.236,27 €	31.820,38 €	32.415,43 €	33.021,59 €	33.639,10 €	34.268,15 €
Seguros	6.079,37 €	6.160,23 €	6.242,16 €	6.325,18 €	6.409,30 €	6.494,55 €	6.580,92 €	6.668,45 €
Costes fiscales	768,80 €	772,72 €	776,66 €	780,62 €	784,60 €	788,61 €	792,63 €	796,67 €
Mantenimiento y reparaciones	5.400,00 €	5.471,82 €	5.544,60 €	5.618,34 €	5.693,06 €	5.768,78 €	5.845,50 €	5.923,25 €
Dietas del conductor	12.697,70 €	12.935,15 €	13.177,03 €	13.423,44 €	13.674,46 €	13.930,18 €	14.190,67 €	14.456,04 €
Peajes	1.617,77 €	1.639,29 €	1.661,09 €	1.683,18 €	1.705,57 €	1.728,25 €	1.751,24 €	1.774,53 €
Amortización	14.039,56 €	14.039,56 €	14.039,56 €	14.039,56 €	14.039,56 €	14.039,56 €	14.039,56 €	14.039,56 €
Financiación	2.385,76 €	2.385,76 €	2.385,76 €	2.385,76 €	2.385,76 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Energía Eléctrica	10.725,00 €	10.635,98 €	10.547,70 €	10.460,16 €	10.373,34 €	10.287,24 €	10.201,86 €	10.117,18 €
Neumáticos	6.887,64 €	6.979,25 €	7.072,07 €	7.166,13 €	7.261,44 €	7.358,01 €	7.455,88 €	7.555,04 €
Costes indirectos	5.442,10 €	5.500,96 €	5.560,97 €	5.622,17 €	5.684,55 €	5.605,01 €	5.669,84 €	5.735,93 €
Total	96.143,70 €	97.183,58 €	98.243,87 €	99.324,92 €	100.427,07 €	99.021,77 €	100.167,19 €	101.334,79 €
Total Acumulado	791.846,89 €							

(Elaboración propia)

Tabla 32. Costes a largo plazo del Lion Electric eLion8T® para el contexto español

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8
Personal de conducción	30.100,00 €	30.388,96 €	30.680,69 €	30.975,23 €	31.272,59 €	31.572,81 €	31.875,91 €	32.181,92 €
Seguros	6.079,37 €	6.145,64 €	6.212,62 €	6.280,34 €	6.348,80 €	6.418,00 €	6.487,95 €	6.558,67 €
Costes fiscales	768,80 €	772,72 €	776,66 €	780,62 €	784,60 €	788,61 €	792,63 €	796,67 €
Mantenimiento y reparaciones	5.400,00 €	5.458,86 €	5.518,36 €	5.578,51 €	5.639,32 €	5.700,79 €	5.762,92 €	5.825,74 €
Dietas del conductor	12.697,70 €	12.819,60 €	12.942,67 €	13.066,92 €	13.192,36 €	13.319,00 €	13.446,87 €	13.575,96 €
Peajes	1.617,77 €	1.635,40 €	1.653,23 €	1.671,25 €	1.689,47 €	1.707,88 €	1.726,50 €	1.745,32 €
Amortización	17.848,23 €	17.848,23 €	17.848,23 €	17.848,23 €	17.848,23 €	17.848,23 €	17.848,23 €	17.848,23 €
Financiación	3.021,96 €	3.021,96 €	3.021,96 €	3.021,96 €	3.021,96 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Energía Eléctrica	13.299,00 €	12.806,94 €	12.333,08 €	11.876,76 €	11.437,32 €	11.014,14 €	10.606,61 €	10.214,17 €
Neumáticos	8.418,23 €	8.509,99 €	8.602,75 €	8.696,52 €	8.791,31 €	8.887,13 €	8.984,00 €	9.081,93 €
Costes indirectos	5.955,06 €	5.964,50 €	5.975,42 €	5.987,78 €	6.001,56 €	5.835,40 €	5.851,90 €	5.869,72 €
Total	105.206,12 €	105.372,79 €	105.565,67 €	105.784,11 €	106.027,51 €	103.091,98 €	103.383,52 €	103.698,32 €
Total Acumulado	838.130,02 €							

(Elaboración propia)

Tabla 33. Costes a largo plazo del Lion Electric eLion8T® para el contexto europeo

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8
Personal de conducción	30.100,00 €	30.662,87 €	31.236,27 €	31.820,38 €	32.415,43 €	33.021,59 €	33.639,10 €	34.268,15 €
Seguros	6.079,37 €	6.160,23 €	6.242,16 €	6.325,18 €	6.409,30 €	6.494,55 €	6.580,92 €	6.668,45 €
Costes fiscales	768,80 €	772,72 €	776,66 €	780,62 €	784,60 €	788,61 €	792,63 €	796,67 €
Mantenimiento y reparaciones	5.400,00 €	5.471,82 €	5.544,60 €	5.618,34 €	5.693,06 €	5.768,78 €	5.845,50 €	5.923,25 €
Dietas del conductor	12.697,70 €	12.935,15 €	13.177,03 €	13.423,44 €	13.674,46 €	13.930,18 €	14.190,67 €	14.456,04 €
Peajes	1.617,77 €	1.639,29 €	1.661,09 €	1.683,18 €	1.705,57 €	1.728,25 €	1.751,24 €	1.774,53 €
Amortización	17.848,23 €	17.848,23 €	17.848,23 €	17.848,23 €	17.848,23 €	17.848,23 €	17.848,23 €	17.848,23 €
Financiación	3.021,96 €	3.021,96 €	3.021,96 €	3.021,96 €	3.021,96 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Energía Eléctrica	13.299,00 €	13.188,62 €	13.079,15 €	12.970,60 €	12.862,94 €	12.756,18 €	12.650,30 €	12.545,30 €
Neumáticos	8.418,23 €	8.530,19 €	8.643,64 €	8.758,60 €	8.875,09 €	8.993,13 €	9.112,74 €	9.233,94 €
Costes indirectos	5.955,06 €	6.013,86 €	6.073,85 €	6.135,03 €	6.197,44 €	6.079,77 €	6.144,68 €	6.210,87 €
Total	105.206,12 €	106.244,93 €	107.304,64 €	108.385,57 €	109.488,09 €	107.409,26 €	108.556,01 €	109.725,43 €
Total Acumulado	862.320,06 €							

(Elaboración propia)

Tabla 34. Variación acumulada de las emisiones

Año	Freightliner Cascadia®	Kenworth T680 Next Gen®	Contexto España		Contexto Unión Europea	
			Tesla Semi®	Lion Electric eLion8T®	Tesla Semi®	Lion Electric eLion8T®
2019	66.286,00	68.382,00	25.875,00	32.085,00	34.375,00	42.625,00
2020	66.286,00	68.382,00	24.968,18	30.960,55	32.350,11	40.114,14
2021	66.286,00	68.382,00	24.061,36	29.836,09	30.325,23	37.603,28
2022	66.286,00	68.382,00	23.154,55	28.711,64	28.300,34	35.092,42
2023	66.286,00	68.382,00	22.247,73	27.587,18	26.275,45	32.581,56
2024	66.286,00	68.382,00	21.340,91	26.462,73	24.250,57	30.070,70
2025	66.286,00	68.382,00	20.434,09	25.338,27	22.225,68	27.559,85
2026	66.286,00	68.382,00	19.527,27	24.213,82	20.200,80	25.048,99
2027	66.286,00	68.382,00	18.620,45	23.089,36	18.175,91	22.538,13
2028	66.286,00	68.382,00	17.713,64	21.964,91	16.151,02	20.027,27
2029	66.286,00	68.382,00	16.806,82	20.840,45	14.126,14	17.516,41
2030	66.286,00	68.382,00	15.900,00	19.716,00	12.101,25	15.005,55
Total Acumulado	795.432,00	820.584,00	250.650,00	310.806,00	278.857,50	345.783,30

(Elaboración propia)

Anexo E. Índice de acrónimos

BI: *Business Intelligence* - Inteligencia de Negocios.

CAD: *Computer Aided Design* - Diseño Asistido por Computadora.

CEPAL: Comisión Económica para América Latina y el Caribe.

EEUU: Estados Unidos.

EPA: Environmental Protection Agency, Estados Unidos.

GPS: *Global Positioning System* - Sistema de Posicionamiento Global.

IVA: Impuesto al Valor Agregado.

ONU: Organización de la Naciones Unidas.

PIB: Producto Interno Bruto.

TIC: Tecnologías de la Información y la Comunicación.

TMS: *Transport Management System* - Sistema de Gestión del Transporte.

UE: Unión Europea.

UNIR: Universidad Internacional de la Rioja.

WMS: *Warehouse Management System* - Sistema de Gestión de Almacenes.

Anexo F. Índice de elementos y compuestos químicos

Ag: Plata.

CO: Monóxido de carbono.

CO₂: Dióxido de carbono.

NO: Monóxido de nitrógeno.

NO_x: Óxidos de nitrógeno.

Pt: Platino.

SO_x: Óxidos de azufre.