



Trabajo Fin de Grado

Análisis de factores determinantes para la optimización de operaciones de transporte mediante el uso de tecnologías avanzadas: Logística 4.0

Analysis of the determining factors for the optimization of transport operations through the use of advanced technologies: Logistics 4.0

Autora

Cristina Zaldívar Jiménez

Directores

Emilio Larrodé Pellicer

M.ª Victoria Muerza Marín

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2019

RESUMEN

Actualmente el transporte de mercancías es una de las actividades industriales más relevantes tanto a nivel nacional como internacional, especialmente el transporte por carretera que representa en España el 95% de la movilidad total. Esta situación hace que las empresas del sector estén cada vez más interesadas en utilizar nuevas tecnologías que les permitan optimizar sus operaciones de transporte tanto en términos económicos como sociales, medioambientales y tecnológicos.

Es por este motivo por el que se ha decidido realizar este Trabajo Fin de Grado, con el que se pretende plasmar una metodología de selección de tecnologías que permita la optimización de operaciones de transporte.

Para ello, en primer lugar, se realizó un estudio del panorama tecnológico actual del que se extraerán las tecnologías que tienen cabida en la optimización de operaciones de transporte. Una vez se tuvo la información necesaria y esta se organizó de forma que pueda compararse de forma objetiva, se aplicó la metodología del Proceso Analítico Jerárquico (AHP). La aplicación de este método exigió la participación en el estudio de una serie de expertos en la materia, gracias a cuyas opiniones pudieron establecerse la jerarquía y los pesos de los factores más influyentes en este proceso de optimización.

Finalmente, se procedió a un análisis de los resultados obtenidos de cada uno de los expertos para poder llegar a una decisión global que arroje la priorización de alternativas que ayuden a optimizar las operaciones de transporte.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|--|----|
| 1. Introducción..... | 7 |
| 2. Descripción del problema..... | 9 |
| 2.1. Nuevas tecnologías en el sector del transporte | 9 |
| 2.2. Análisis y selección de tecnologías..... | 10 |
| 3. Planteamiento teórico..... | 24 |
| 3.1. Proceso Analítico Jerárquico (AHP)..... | 24 |
| 3.2. Jerarquía. Construcción y descripción..... | 24 |
| 3.2.1. Construcción..... | 24 |
| 3.2.2. Descripción | 25 |
| 3.3. Evaluación del modelo jerárquico | 27 |
| 4. Resultados y análisis de sensibilidad..... | 29 |
| 4.1. Resultados | 29 |
| 4.2. Análisis de sensibilidad..... | 34 |
| 5. Discusión y conclusiones..... | 39 |
| 6. Bibliografía y webgrafía..... | 40 |
| Anexo 1. Sistemas alternativos de propulsión | 43 |
| Anexo 2. Método AHP..... | 51 |
| Anexo 3. Cuestionario de evaluación del modelo propuesto | 57 |
| Anexo 4. Valoraciones de los expertos..... | 63 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Evolución del transporte nacional por modos 2007/2017 | 8 |
| Tabla 2. Tecnologías según su grupo de pertenencia | 20 |
| Tabla 3. Correlación aplicación-grupo de tecnologías | 20 |
| Tabla 4. Comparación escalas TRL tradicional-NextNet | 21 |
| Tabla 5. Escala <i>Trend Assessment</i> | 21 |
| Tabla 6. Valores TRL y TA para las tecnologías propuestas | 21 |
| Tabla 7. Elementos de la jerarquía | 25 |
| Tabla 8. Valores escala de Saaty | 27 |
| Tabla 9. Vectores propios y vector global para criterios de primer nivel | 29 |
| Tabla 10. Vectores propios y vector local para subcriterios del criterio C1 | 29 |
| Tabla 11. Vectores propios y vector local para subcriterios del criterio C2 | 29 |
| Tabla 12. Vectores propios y vector local para subcriterios del criterio C3 | 29 |
| Tabla 13. Vectores propios y vector local para subcriterios del criterio C4 | 30 |
| Tabla 14. Vectores propios y vector global para alternativas referentes a SC1.1 ... | 30 |
| Tabla 15. Vectores propios y vector global para alternativas referentes a SC1.2 ... | 30 |
| Tabla 16. Vectores propios y vector global para alternativas referentes a SC1.3 ... | 30 |
| Tabla 17. Vectores propios y vector global para alternativas referentes a SC2.1 ... | 30 |
| Tabla 18. Vectores propios y vector global para alternativas referentes a SC2.2 ... | 30 |
| Tabla 19. Vectores propios y vector global para alternativas referentes a SC2.3 ... | 31 |
| Tabla 20. Vectores propios y vector global para alternativas referentes a SC3.1 ... | 31 |
| Tabla 21. Vectores propios y vector global para alternativas referentes a SC3.2 ... | 31 |
| Tabla 22. Vectores propios y vector global para alternativas referentes a SC4.1 ... | 31 |
| Tabla 23. Vectores propios y vector global para alternativas referentes a SC4.2 ... | 31 |
| Tabla 24. Vectores propios y vector global para alternativas referentes a SC4.3 ... | 31 |
| Tabla 25. Matriz de decisión | 32 |
| Tabla 26. Pesos globales de las alternativas (cálculo manual) | 33 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Cadena de suministro. Ejemplo | 7 |
| Figura 2. RA en la conducción | 11 |
| Figura 3. RA en almacén de mercancías..... | 11 |
| Figura 4. <i>Data science</i> | 12 |
| Figura 5. <i>Internet of things</i> | 13 |
| Figura 6. Vehículo autónomo | 14 |
| Figura 7. Dron | 14 |
| Figura 8. <i>Blockchain</i> | 15 |
| Figura 9. <i>Cloud logistics</i> | 16 |
| Figura 10. Inteligencia artificial | 16 |
| Figura 11. Uso de PDAs en camiones | 17 |
| Figura 12. Uso de gafas de RA en almacenes | 17 |
| Figura 13. Distintos <i>wearables</i> | 17 |
| Figura 14. Código de barras y código QR..... | 18 |
| Figura 15. Etiqueta RFID | 18 |
| Figura 16. Esquema <i>platooning</i> | 18 |
| Figura 17. Esquema tecnología GPS | 18 |
| Figura 18. Jerarquía propuesta | 25 |
| Figura 19. Jerarquía en el software <i>SuperDecisions</i> | 27 |
| Figura 20. Introducción de vector propio y obtención de pesos en <i>SuperDecisions</i> | 32 |
| Figura 21. Resultado del análisis obtenido en <i>SuperDecisions</i> | 33 |
| Figura 22. Sensibilidad del modelo a variaciones de C1 | 34 |
| Figura 23. Sensibilidad del modelo a variaciones de C2 | 34 |
| Figura 24. Sensibilidad del modelo a variaciones de C3 | 34 |
| Figura 25. Sensibilidad del modelo a variaciones de C4 | 34 |
| Figura 26. Sensibilidad del modelo a variaciones de SC1.3 | 35 |
| Figura 27. Sensibilidad del modelo a variaciones de SC3.2 | 36 |
| Figura 28. Sensibilidad del modelo a variaciones de SC4.3 | 37 |
| Figura 29. Sensibilidad del modelo a variaciones de SC2.2 | 38 |

1. Introducción

El concepto de cadena de suministro (o *supply chain*, SC) hace referencia al conjunto de procesos que participan sucesivamente, de manera directa o indirecta, en la acción de satisfacer las necesidades de suministro de un cliente. Cada uno de los procesos involucrados en la cadena representa un eslabón de esta, y la forma en la que dichos eslabones se conectan e interactúan determina la eficacia y competitividad del conjunto. Actualmente la tecnología es uno de los factores clave en este aspecto: su aplicación en las cadenas de suministro ayuda a mejorar características tales como la agilidad, la transparencia o la confiabilidad de cualquiera de los procesos.



Figura 1. Cadena de suministro. Ejemplo
(Fuente: Google imágenes [1])

Uno de los eslabones con más peso en cualquier cadena de suministro es el transporte de mercancías. Cuando dentro de una SC se habla de una operación de transporte puede tratarse de una operación de aprovisionamiento, transporte interno, distribución o una combinación de estas.

- **Operación de aprovisionamiento:** se conoce como operación de aprovisionamiento a todo el proceso que se sigue para que una compañía se provea del material necesario para su correcto funcionamiento. Es el movimiento de mercancías desde el proveedor hasta la empresa.
- **Operación de transporte interno:** como su nombre indica, son operaciones de carácter interno en la empresa. Las mercancías se mueven dentro de un almacén o entre dos edificios relativamente próximos.
- **Operación de distribución:** este tipo de operaciones comprenden los pasos a seguir desde que el producto terminado sale de la fábrica/almacén hasta que llega a su destino final de venta o nuevo almacenaje. Es el movimiento de mercancías desde el fabricante/distribuidor hasta el cliente.

Este trabajo se va a centrar en las operaciones de distribución de mercancías propiamente dichas, aunque las operaciones de aprovisionamiento podrían ser perfectamente semejables a estas.

En la Tabla 1 se muestra la evolución en la última década del transporte nacional total de mercancías (en miles de toneladas) por modos.

1. Introducción

| | 2007 | 2016 | 2017 | Variación 2017/2016 | Variación 2017/2007 |
|--------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|
| Carretera | 2.353.352 (96,85%) | 1.215.353 (94,45%) | 1.335.365 (94,72%) | +9.9% | -43.3% |
| Ferroviario | 26.859 (1,11%) | 23.120 (1,8%) | 23.717 (1,68%) | +2.6% | -11.7% |
| Aéreo | 102 (0,004%) | 62 (0,005%) | 65 (0,005%) | +5.3% | -36.1% |
| Marítimo | 49.597 (2,04%) | 48.114 (3,74%) | 50.613 (3,6%) | +5.2% | +2.0% |

Tabla 1. Evolución del transporte nacional por modos 2007/2017

(Fuente: Observatorio del Transporte y la Logística, Informe anual 2018 [2])

Como se puede apreciar en la tabla el sector del transporte en España está claramente dominado por el transporte terrestre, en concreto por el transporte por carretera, representando cerca del 95% de la movilidad interior. Esta situación junto con los cada vez más numerosos avances tecnológicos hace que la optimización de operaciones de transporte por carretera cobre gran importancia.

El objetivo último de este trabajo es poder ofrecer, para operaciones de distribución de mercancías, una serie de tecnologías que permitan su optimización. Para ello, es necesario primero definir qué se considera una operación de transporte.

Se entiende por operación de transporte el conjunto de actividades que tienen como finalidad mover una determinada mercancía de un punto de origen a un punto final, englobando la preparación de la operación, el movimiento físico de la mercancía como tal y la evaluación final. Podríamos dividir entonces una operación de transporte en distintas fases:

- **Planificación de la operación:** en esta primera fase se tratan puntos como qué se va a transportar, con qué vehículo se va a realizar el transporte, qué va a necesitarse para cargar/descargar el vehículo... Después de esto se pasa a planificar el recorrido físico de la operación. En este puede haber paradas en almacenes intermedios para cargar y/o descargar otras mercancías (dependiendo de si se trata de un transporte de carga completa o fraccionada) hasta llegar al punto final, por lo que optimizarlo será de gran importancia.
- **Seguimiento de la operación:** es de vital importancia conocer dónde y cómo se encuentran tanto la mercancía como el vehículo durante el transporte propiamente dicho.
- **Finalización y evaluación de la operación:** cada vez que se descargue una mercancía en su punto de destino (pudiendo ser este un punto intermedio o el destino final) ha de evaluarse la operación en distintos términos. Algunos de estos son:
 - **Económicos:** la operación se ha desarrollado o no dentro de unos costes establecidos y previstos en su planificación.
 - **Medioambientales:** las emisiones provocadas por el vehículo son las mínimas esperadas, están dentro de un rango admisible...
 - **Operativos:** el servicio efectuado es de una calidad mínima establecida (entregas correctas, plazos de tiempo respetados...)

Identificados los términos principales de este trabajo, el siguiente paso es realizar una búsqueda de las posibles tecnologías que pueden utilizarse para optimizar operaciones de transporte y la posterior comparación entre ellas. A lo largo de los siguientes apartados se procederá a recopilar la información necesaria y su aplicación al caso de estudio.

2. Descripción del problema

La introducción de nuevas tecnologías en el sector del transporte de mercancías es un hecho evidente, pero también lo es que la calidad y optimización de los servicios (entendiendo por estos las propias operaciones de transporte) dependerá de su correcta aplicación.

El objetivo principal de este trabajo es identificar y seleccionar aquellas nuevas tecnologías que permitan optimizar distintas operaciones de transporte mediante una comparación entre las existentes en el sector. Para ello la línea de trabajo a seguir durante los próximos apartados será la siguiente:

- **Recopilación** de información acerca de las nuevas tecnologías presentes en el sector del transporte. Para cada una de las tecnologías se recogerá información sobre su situación actual (si ya se aplica en el sector, se prevé aplicar a corto/largo plazo...), ejemplos de uso (existentes o futuros).
- **Comparación** entre las tecnologías existentes y selección de un grupo reducido según distintos criterios.
- **Aplicación** del Proceso Analítico Jerárquico (AHP). Reducido ya el número de tecnologías, se procederá a aplicar el método AHP para determinar cuáles de estas tecnologías son preferibles en un caso de estudio. Previo a la aplicación del método deberá proponerse una jerarquía y unas relaciones entre los elementos de la jerarquía. Todo este procedimiento aparece correctamente desarrollado en el apartado 3 de este trabajo.
- Obtención, recopilación y análisis de los **resultados**.

2.1. Nuevas tecnologías en el sector del transporte

Existe un amplio abanico de nuevas tecnologías, implantadas o listas para implantar, en el sector del transporte que persiguen el fin de optimizar operaciones. Podemos clasificar todas ellas en 4 grupos claramente diferenciados:

Grupo 1 – Tecnologías que afectan a la tracción de los vehículos.

Grupo 2 – Tecnologías que afectan a la planificación de las operaciones.

Grupo 3 – Tecnologías que afectan a la carga y la accesibilidad al medio de transporte.

Grupo 4 – Tecnologías que afectan a la información de la operación.

Al igual que existe una gran variedad de tecnologías, existen también multitud de fuentes (compañías, proyectos de investigación, gobiernos...) especializadas en su estudio. A lo largo de este apartado se van a señalar distintas fuentes de información consultadas y se definirán las principales tecnologías habilitadoras para optimizar las operaciones de transporte que estas consideran.

Las empresas son las principales afectadas por la constante modernización del sector del transporte, por lo que siempre intentan incluir en sus procesos todas las innovaciones disponibles para poder mantener e incrementar tanto su competitividad como sus clientes. Éstas dedican una gran parte de su presupuesto a I+D+i en la actualidad, es decir, a la investigación e implantación de herramientas que les permitan optimizar sus operaciones

2. Descripción del problema

(menor coste y tiempo). En este sentido, las nuevas tecnologías en el transporte son foco de una gran parte de sus estudios y proyectos.

Un claro ejemplo de ello es DHL, empresa líder mundial en la industria de la logística y el transporte, que recopila desde 2013 en su informe anual “*Logistics Trend Radar*” [3] las tendencias que prevé que afecten al sector en los próximos años. En su última edición de 2018/2019 señaló las siguientes tecnologías habilitadoras para la optimización de operaciones de transporte:

- Realidad aumentada
- *Big data*
- *Internet of things*
- Vehículos autónomos
- *Blockchain*
- *Cloud Logistics*

Hay que destacar que las investigaciones que se llevan a cabo en empresas son de carácter privado y son usadas para obtener ventajas sobre el resto de los competidores. Existen otras investigaciones de carácter público y accesible que aportan conocimientos y son la base de la modernización de empresas con menos recursos en I+D+i. Un ejemplo de estos proyectos de investigación es el proyecto europeo NextNet, que se engloba dentro del programa europeo de investigación Horizon 2020. Este proyecto tiene como uno de sus objetivos principales el identificar futuros escenarios industriales basados en el análisis de tendencias y su impacto en las cadenas de suministro [4]. En uno de sus múltiples informes, el entregable D3.1 “*Technology Mapping and Scouting*” [5][6] se analiza la influencia y aplicabilidad de una serie de nuevas tecnologías en distintos sectores industriales, entre ellos el del transporte de mercancías. Las tecnologías habilitadoras para la optimización de operaciones de transporte que este informe propone son:

- Sistemas de transporte autónomo
- Sistemas informáticos basados en la nube
- *Internet of things*
- *Blockchain*
- *Data science*
- Dispositivos móviles y portátiles
- Tecnologías de identificación
- Tecnologías de localización
- Sistemas alternativos de propulsión
- Materiales inteligentes

2.2. Análisis y selección de tecnologías

Viendo todas las tecnologías anteriormente mencionadas se observa que algunas de ellas son comunes en las fuentes de información consultadas. De esta manera, se identifica un grupo de 12 nuevas tecnologías que se consideran capaces de optimizar operaciones de transporte de mercancías: Realidad Aumentada, *Data Science*, *Internet of Things*, Vehículos autónomos y no tripulados, *Blockchain*, *Cloud Logistcis*, Inteligencia Artificial, Dispositivos móviles y portátiles, Tecnologías de identificación, Tecnologías de localización, Sistemas de propulsión alternativos y Materiales inteligentes. A continuación, se presenta un inventario con las tecnologías en cuestión, en el que se recoge para cada una de estas:

- Una breve descripción de la tecnología.
- Cuál es su situación actual en el sector. Es importante saber el desarrollo de cada tecnología, si se encuentra todavía en fase de estudio o si ya se ha comenzado a aplicar en la realidad y a qué nivel.
- Distintas formas de uso, tanto presentes como posibles en un futuro.

1) **Realidad aumentada:** se entiende por realidad aumentada (de ahora en adelante RA) al conjunto de tecnologías que permiten visualizar a través de un dispositivo el mundo real con información gráfica añadida en tiempo real. A diferencia de la realidad virtual, la RA no construye un nuevo entorno, sino que modifica el que se capta en tiempo real. Actualmente la RA está presente en una gran cantidad de sectores industriales (automoción, sector del mueble, moda...) y tareas cotidianas (videojuegos, simulaciones...), y empieza a aplicarse en el campo del transporte de mercancías. La compañía DHL ha considerado la RA como una tecnología prometedora para el transporte y la logística, y así lo refleja en su informe “*Augmented Reality in Logistics*” [7]. Algunos de los usos de esta nueva tecnología que este informe recoge son:

- Conteo de bultos para la confirmación de pedidos preparados correctamente. Con un equipo adecuado de RA junto con escáneres y sensores podría ahorrarse tiempo en las tareas de confirmación y verificación de pedidos.
- Optimización de carga de contenedores. El cuello de botella en las operaciones de transporte suele ser el proceso de carga de la mercancía. Con ayuda de la RA este proceso se agilizaría considerablemente. El operario dispondría de un equipo de RA vinculado a la lista de bultos a cargar (con las características de peso, volumen, destino... de cada uno) y sería el propio software quien le diría qué bulto debe cargar primero y dónde colocarlo.
- Análisis en tiempo real del tráfico. Sin necesidad de sistemas GPS, los conductores pueden disponer de información en tiempo real del tráfico que permite en todo momento alterar la ruta para garantizar el menor tiempo posible.
- Comprobación de la integridad de mercancías. Ligado a los dos primeros usos mencionados, podría añadirse este último. A la vez que se realiza la comprobación de los pedidos y la carga de los contenedores, los softwares de RA podrían ser capaces de comprobar la integridad de los bultos y evitar así envíos defectuosos que perjudicaran la calidad de la operación.

Como sus propios usos indican, la RA es una de las tecnologías que puede implantarse a lo largo de toda la operación de transporte por lo que podría incluirse en los 3 últimos grupos especificados al inicio del apartado 2.1.



Figura 2. RA en la conducción
(Fuente: Google imágenes [8])



Figura 3. RA en almacén de mercancías
(Fuente: Google imágenes [9])

2) **Data science:** la “ciencia de los datos” hace referencia a la resolución de problemas y previsión de fenómenos mediante la aplicación de métodos cuantitativos y cualitativos. Dentro de esta ciencia se han distinguido dos tecnologías que van de la

2. Descripción del problema

mano: *Big Data* y almacenamiento de datos. *Big Data* hace referencia a un conjunto de datos de tal magnitud y complejidad que son necesarias aplicaciones informáticas especializadas para tratarlos. El transporte de mercancías es un sector especialmente inclinado a recoger multitud de datos (climatológicos, tráfico, localizaciones, previsiones financieras...) que se utilizan bien en el momento en el que se recogen o son almacenados para su posterior uso. El uso correcto de estos datos conducirá a mejoras en los servicios de transporte como ajuste de costes, menores tiempos de operación... Existen distintos campos de aplicación del *Big Data* en el sector del transporte, pero el que más se ajusta al esquema de este trabajo persigue la eficiencia operacional. En el caso de esta tecnología, DHL le ha dedicado también un informe específico: “*Big Data in Logistics*”[10], del cual se han extraído algunos ejemplos de uso. También se ha recogido información en cuanto a su uso del proyecto NextNet [6].

- Optimización de rutas de transporte. Puede que esta sea una de las tendencias que más interés tenga en el mundo del transporte de mercancías. Mediante los datos recogidos en tiempo real y almacenados, aplicaciones informáticas son capaces de optimizar la ruta a realizar por el transportista disminuyendo así los recursos necesarios para completarla (tiempo, combustible y, por tanto, dinero).
- Planificación de la estrategia y la capacidad operativa. Si los datos almacenados son referentes a las tendencias económicas, la evolución de la actividad del sector (en términos individuales de la empresa y en conjunto)... podrían utilizarse para diseñar una estrategia óptima para la propia empresa: inversiones en el momento adecuado y en los ítems adecuados que provoquen los mayores beneficios a largo plazo. Además, el análisis de estos datos permitiría definir de mejor forma la capacidad operativa de la empresa y mejorarla si es necesario.

Esta tecnología, por tanto, podría clasificarse como una de las que afectan tanto a la planificación como a la información (grupos 2 y 4) de la operación de transporte.



Figura 4. Data science
(Fuente: Google imágenes [11])

- 3) **Internet of Things (IoT):** el IoT consiste en un intercambio de datos constante por medio de una red de dispositivos físicos equipados con sensores, softwares... Los sensores se usan para captar la información y después, mediante comunicación M2M (*machine to machine*) transmitirla de un dispositivo a otro. Este tipo de tecnología es una de las más fuertes en la actualidad, puesto que cualquier persona dispone de un dispositivo móvil con las características necesarias para aplicarla. Por esto último es una de las tecnologías con más aplicabilidad en el sector del transporte y las dos

fuentes de información consultadas (informes de DHL y el proyecto NextNet [6]) así la clasifican. Los usos más extendidos de esta tecnología son:

- Uso de sensores para recoger información determinada durante toda la operación de transporte, especialmente en el momento exacto del desplazamiento. Con estos sensores pueden recogerse datos acerca del estado de la carga (temperatura, humedad...), la ruta (accidentes, atascos...) y del vehículo (capacidad de carga, apertura no deseada del contenedor, consumo de combustible, emisiones...).
 - Transferencia de información mediante comunicación M2M. Esta tecnología puede hacer que dos vehículos próximos o un único vehículo con un lugar fijo en tierra (almacén, peaje, áreas de estacionamiento, taller de reparaciones, etc.) se mantengan conectados e intercambiando información en tiempo real.

Vemos con los usos comentados que esta tecnología se relaciona con los grupos 3 y 4, ya que afecta tanto a la carga transportada en sí como a la información de la operación.



Figura 5. *Internet of things*
(Fuente: Google imágenes [12])

- 4) **Vehículos autónomos y no tripulados:** se define vehículo autónomo como aquel en el que, habiendo una persona en su interior, la tarea de la conducción se produce sin intervención humana; mientras que un vehículo no tripulado es aquel que no tiene presencia humana y es dirigido remotamente por acción humana. Algunos de estos sistemas ya se han probado de forma piloto para desarrollar tareas sencillas en el ámbito del transporte y la seguridad, pero su aplicabilidad total, aunque puede tardar unos años, puede llegar a ser a gran escala. Algunos de los ejemplos de uso de esta tecnología son:

- Uso de drones para mantenimiento y vigilancia. Pequeños drones con cámaras de vigilancia y sistemas de comunicación podrían ser utilizados para dar asistencia a vehículos averiados en carretera/estacionamientos o incluso para realizar controles sobre flotas que no estén en uso.
 - Conducción autónoma de camiones. La compañía alemana Mercedes-Benz trabaja en un proyecto de un camión autónomo (*Mercedes Future Truck 2025* [13]) guiado por un *Active Drive Assist* (ADV) en el que el humano piensa y el ordenador “conduce”. El ADV es capaz de conducir autónomamente pero no de tomar decisiones muy concretas. Mientras el vehículo se mueve el conductor podría dedicar tiempo para buscar lugares de descanso, procesar órdenes de pedido en la ruta y realizar otras tareas. Esta tecnología

2. Descripción del problema

permitiría tener una conducción más segura, con menor consumo de combustible y con unas mejores condiciones de trabajo para los conductores.

- Guiado de camiones. La conducción autónoma podría extenderse hasta el punto de que un único conductor fuese capaz de conducir un convoy de 2 o más camiones. Mientras el conductor conduciría de forma tradicional el primer camión del convoy, el resto de los camiones, gracias a comunicación V2V (*vehicle to vehicle*), seguirían a este primero e imitarían su ruta. Esta tecnología podría llegar hasta el punto de prescindir incluso del primer conductor y que el convoy de camiones fuese totalmente autónomo.

Esta tecnología formaría parte tanto de las tecnologías que afectan a la planificación de la operación como de aquellas que afectan a la información de esta (grupos 2 y 4).



Figura 6. Vehículo autónomo
(Fuente: Google imágenes [14])



Figura 7. Dron
(Fuente: Google imágenes [15])

- 5) **Blockchain:** se entiende por *blockchain* una red de nodos (ordenadores) conectados entre sí que almacenan datos encriptados en bloques que forman una cadena. Estos datos pueden ser compartidos con usuarios autorizados de forma segura, garantizando transparencia y privacidad a partes iguales. Este sistema de intercambio de información es dinámico, colaborativo, transparente, confiable e inmutable. Con esta tecnología se evita la aparición de terceros que puedan ser un obstáculo en la realización de operaciones financieras, relaciones contractuales, etc. Actualmente hay una ligera aparición de esta tecnología en el mundo del transporte y su futuro es muy prometedor para mejorar las relaciones contractuales.

- Implantación de *smart contracts* (o contratos inteligentes). Estos contratos son contratos ejecutables por sí mismos que no dependen del control de ninguna de las partes, se ejecutan en cada uno de los nodos de la red de bloques que se ven afectados por los mismos.
- Utilización de criptomonedas. Aunque esta tendencia no está del todo extendida en el sector del transporte, su futura aplicación sería una gran ventaja para el sector. Al estar encriptada es difícil de falsificar y, además, no depende de ningún órgano de gobierno.

Puesto que el *blockchain* es una cadena de transmisión de información, sería una tecnología perteneciente al grupo 4 anteriormente definido.

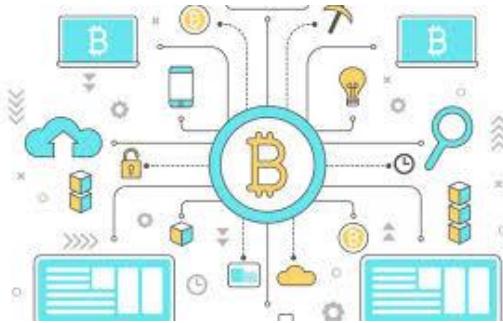


Figura 8. Blockchain
(Fuente: Google imágenes [16])

- 6) **Logística en la nube:** esta es una tecnología de la información en la cual los datos y servicios están disponibles en una nube (pública, privada o mixta) a la cual se accede mediante conexión a internet o con una aplicación específica. Estos datos y servicios se proporcionan a los clientes como bienes y pueden ser entregados en cualquier dispositivo con conexión a internet. Las cadenas de suministro actuales utilizan una gran cantidad de sistemas de gestión para poder coordinar todos sus procesos, como puede ser una operación de transporte. Utilizando la nube, toda la información puede coordinarse y agilizar los procesos de manera muy efectiva. Aunque son pocas las empresas que tienen virtualizado todo su sistema de gestión de la cadena de suministro, algunos de los usos que comienzan a verse de esta tecnología son:

- Administración de los datos de una operación. Aunque el proceso de digitalizar todos los datos referentes a una operación de transporte sea tedioso (entradas y salidas de material, tiempos de carga, trasladados y esperas...) facilita la acción de los trabajadores en una gran medida. Estos tienen acceso a todos los datos de una operación determinada y no es necesario el intercambio de información físico entre trabajadores que hace perder tiempo y calidad de la información.
 - Monitoreo de flotas. Conseguir el menor tiempo de entrega en los transportes de mercancías es uno de los objetivos clave, y con softwares como SimpliRoute puede optimizarse esta tarea dando seguimiento a toda la flota disponible en tiempo real.
 - Obtención de datos sobre movilidad. Un ejemplo de este uso es la “*TIC Platform*” [17] de Berlín. En esta plataforma se recogen datos para obtener información sobre la movilidad en la ciudad de Berlín. Esto podría aplicarse a nivel nacional en España y disponer de información permanentemente actualizada y almacenada en la nube que ayudase a optimizar rutas de transporte.

Tal y como se ha indicado al introducir esta tecnología, es una tecnología de la información, por lo que se agruparía dentro del grupo 4.

2. Descripción del problema



Figura 9. *Cloud logistics*
(Fuente: Google imágenes [18])

7) **Inteligencia artificial:** se entiende por inteligencia artificial la simulación de procesos de inteligencia humana por parte de máquinas. Estos procesos incluyen el aprendizaje, el razonamiento y la autocorrección. Esta es una de las tecnologías más futuristas que se pretenden introducir en el sector del transporte y, aunque ya existen pequeñas evidencias de su uso y su aplicabilidad es amplia, todavía es pronto para ver un uso en masa de esta tecnología. Alguno de sus usos (futuros y presentes) son:

- Inspección de flotas. Mediante máquinas correctamente programadas, podrían llegar a realizarse de forma automatizada las inspecciones periódicas de los vehículos de toda una flota.
- Comunicación con chatbots. Un chatbot es un programa que simula mantener una conversación con una persona proveyendo respuestas automáticas. Aunque la dificultad de las frases introducidas por el usuario no puede ser excesiva, los chatbots son una herramienta de asistencia 24h muy utilizada.

Este tipo de tecnología podría incluirse en los grupos 2 y 4 (planificación e información de la operación).

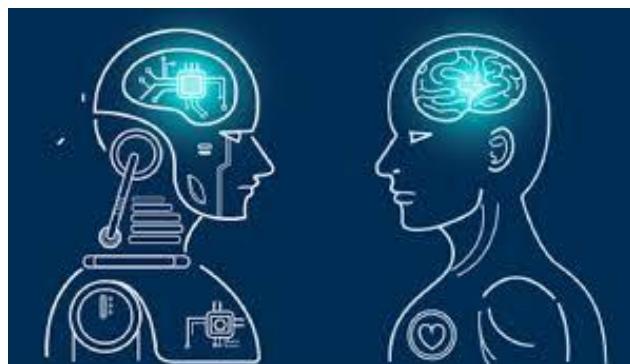


Figura 10. Inteligencia artificial
(Fuente: Google imágenes [19])

8) **Dispositivos móviles y portátiles:** este grupo de dispositivos engloba tanto a los dispositivos móviles en sí (teléfonos, tablets...) como a los conocidos *wearables*: dispositivos cuyo soporte es el cuerpo humano (ropa, gafas, cascos...). En la sociedad actual cualquier persona dispone de un dispositivo de este tipo, pero esta tecnología todavía no se aplica en su máximo nivel. Algunos de los usos que ya comienzan a verse en el sector del transporte y otros posibles en un futuro son:

- Utilización de PDAs. La recopilación de información sobre una operación de transporte se realiza por medio de PDAs o tablets individuales por parte de los transportistas. Datos como las fechas de entrega, los albaranes y las incidencias en la ruta se recogen, almacenan en la nube y después se utilizan para mejorar futuros servicios o evaluar el realizado. El hecho de utilizar estos dispositivos, además, agiliza la operación
- Utilización de equipos de realidad aumentada. Ligado a la primera tecnología expuesta en este apartado, el uso de equipos de RA (gafas y auriculares) para desempeñar tareas como el conteo de bultos, la carga de contenedores e incluso pequeñas reparaciones en los vehículos está comenzando a tener un gran auge en el sector.

El uso de este tipo de dispositivos está enfocado a las tareas previas y posteriores al transporte físico de la mercancía, es decir, a la planificación de la operación y a la recopilación de información sobre esta. Se incluye pues esta tecnología en los grupos 2, 3 y 4.



Figura 11. Uso de PDAs en camiones
(Fuente: Google imágenes [20])



Figura 12. Uso de gafas de RA en almacenes
(Fuente: Google imágenes [21])

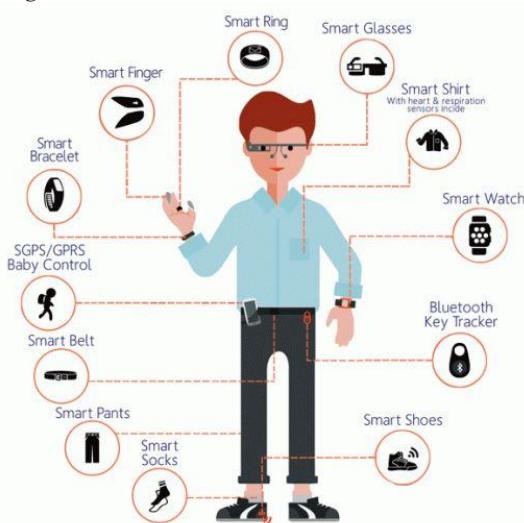


Figura 13. Distintos wearables
(Fuente: Google imágenes [22])

- 9) **Tecnologías de identificación:** son aquellas utilizadas para identificar y rastrear ítems gracias al uso de distintos *tags*. Actualmente las más conocidas son los códigos de barras y los códigos QR, pero la RFID está cobrando una gran importancia en los últimos años. Todas ellas son aplicadas a gran escala en el sector del transporte de mercancías y tienen el mismo uso, identificar ítems. Este tipo de tecnología encaja

2. Descripción del problema

principalmente en el grupo de tecnologías relacionadas con la planificación de la operación, aunque también puede incluirse en las tecnologías que afectan a la carga como tal, puesto que el lugar más común de colocación de los *tags* es en los bultos.



Figura 14. Código de barras y código QR
(Fuente: Google imágenes [23])



Figura 15. Etiqueta RFID
(Fuente: Google imágenes [24])

10) Tecnologías de localización: como su propio nombre indica, las tecnologías de localización son capaces de localizar un ítem (objeto, trabajador, vehículo...) en cualquier espacio (abierto o cerrado). Para lograr localizar cualquier ítem se utilizan GPS activos y/o pasivos; siendo esta una de las herramientas con mayor aplicabilidad en el sector del transporte. Cabe destacar que todavía no se aplica esta tecnología individualmente, sino que siempre va ligada a otras. Algunos ejemplos de ello son:

- Rastreo de vehículos y flotas. Mediante sistemas de GPS pasivos puede conocerse con detalle la ubicación de cualquier vehículo en tiempo real. Un ejemplo de esto es el software “Track your truck” [25].
- Guiado inteligente de vehículos (*platooning*). Conocida la posición de cualquier vehículo y con la ayuda de sistemas GPS activos podría llegar a guiar de forma efectiva por la mejor ruta de transporte.

La principal etapa de uso de estas tecnologías es durante el transporte en sí de la mercancía, por lo que podría incluirse en el grupo 4 anteriormente citado.

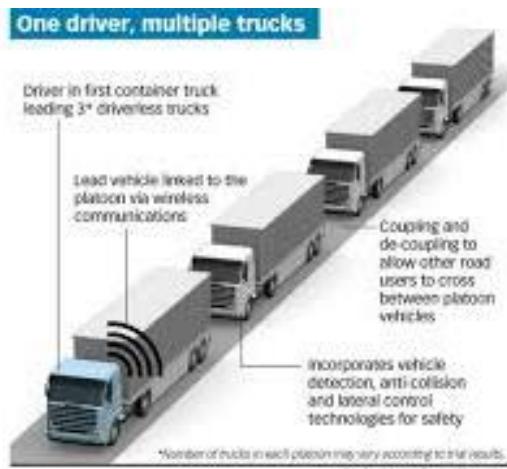


Figura 16. Esquema *platooning*
(Fuente: Google imágenes [26])



Figura 17. Esquema tecnología GPS
(Fuente: Google imágenes [27])

11) Sistemas alternativos de propulsión: la contaminación provocada por los gases de escape procedentes de los vehículos utilizados en las operaciones de transporte es una de las repercusiones más importantes a nivel medioambiental. Es por esto que la búsqueda de otras tecnologías de tracción más respetuosas es el centro de muchos estudios nacionales y diversas directivas europeas. Actualmente, las tecnologías de

tracción alternativas utilizadas, o que se pretenden utilizar, en el sector del transporte español son:

- Gas natural: combustible fósil no derivado del petróleo formado por una rica mezcla de hidrocarburos ligeros con el metano (CH_4) como componente principal.
- Electricidad.
- Gas licuado del petróleo (GLP): mezcla de propano y butano que se usa principalmente en vehículos ligeros, pero puede utilizarse en menor medida en vehículos comerciales.
- Hidrógeno.
- Biocarburantes: combustibles líquidos de origen renovable (bioetanol, biodiésel, HVO) o gaseosos (biometano) producidos a partir de biomasas.

Todo este tipo de tecnologías se clasifican dentro del grupo 1, ya que afectan a la tracción de los vehículos utilizados en las operaciones de transporte.

En el Anexo 1 se adjunta información más detallada acerca de todos los tipos de combustibles alternativos, su fase de implantación en el sector del transporte nacional, así como algunos ejemplos de su uso.

12) Materiales inteligentes: se considera material inteligente a todo material que posee al menos una propiedad que puede ser controlada y modificada reversible y significativamente de manera externa. Esta tecnología todavía está en fase de estudio y pruebas, pero algunos de los usos más importantes que puede tener en un futuro son:

- Incorporación de etiquetas inteligentes. Etiquetas fabricadas de este tipo de materiales serían capaces de detectar cambios en temperatura, humedad, concentración de sustancias, entre otros, que serían comunicados bien al transportista o a los almacenes.
- Incorporación de *packaging* inteligente. Podría llevarse la idea de la etiqueta inteligente al extremo y fabricar embalajes e incluso contenedores inteligentes capaces de bien autorregular las condiciones de transporte o bien informar al transportista de los cambios y que fuera este quien reajustase los parámetros necesarios.

Se ve que la tendencia principal de este tipo de tecnologías es la de recoger e intercambiar información, pero esta información casi siempre está relacionada con la carga transportada. Por tanto podría ser asignada dentro de los grupos 3 y 4.

En la Tabla 2 se recogen todas las tecnologías junto con sus grupos de pertenencia. Se puede observar que el grupo mayoritario es el de tecnologías relacionadas con la información de la operación, seguido por los de planificación y carga y, en último lugar, el grupo de las tecnologías de tracción.

2. Descripción del problema

| | GRUPO 1 | GRUPO 2 | GRUPO 3 | GRUPO 4 |
|--|---------|---------|---------|---------|
| Realidad aumentada | | X | X | X |
| Big Data | | X | | X |
| Internet of Things | | | X | X |
| Vehículos autónomos y no tripulados | | X | | X |
| Blockchain | | X | | X |
| Logística en la nube | | X | | X |
| Inteligencia artificial | | X | | X |
| Dispositivos móviles y portátiles | | X | | X |
| Tecnologías de identificación | | X | X | |
| Tecnologías de localización | | | | X |
| Sistemas alternativos de propulsión | X | | | |
| Materiales inteligentes | | | X | X |

Tabla 2. Tecnologías según su grupo de pertenencia

(Fuente: Elaboración propia)

Las diferentes tecnologías recogidas en el inventario anterior presentan dos problemas a la hora de su comparación.

Por un lado, encontrar factores comunes a todas ellas (que permitan una comparación objetiva) de forma equitativa es una tarea difícil. Algunas de ellas son tecnologías hardware (HW) (como los dispositivos de realidad aumentada y las PDAs), otras son sistemas software (SW) (como los programas de optimización de rutas y cargas) y otras son una combinación HW-SW. Ha de establecerse entonces una base de comparación común a todas ellas mediante la cual pueda conseguirse el objetivo último de este trabajo: optimizar operaciones de transporte de mercancías.

Por otro lado, el grado de implantación en el sector es diferente en la gran mayoría de los casos. Mientras unas tecnologías están siendo aplicadas ampliamente en la actualidad (p.ej. *data science* y *wearables*) otras aún se encuentran en fase de desarrollo (p.ej. vehículos autónomos e inteligencia artificial). Es necesario entonces marcar unos límites dentro de los cuales las tecnologías sean comparables en términos temporales.

Durante todo el proceso de recopilación de información se ha visto que, al igual que todas las tecnologías pueden clasificarse en 4 grupos, es posible identificar 4 aplicaciones principales de estas en las operaciones de transporte. Estas aplicaciones guardan una relación directa con los grupos citados previamente y pueden verse en la Tabla 3.

| APLICACIÓN | GRUPO |
|------------------------------------|--|
| Sistema de propulsión del vehículo | → Tracción de los vehículos |
| Optimización de rutas | → Planificación de la operación |
| Optimización de carga | → Carga y accesibilidad al medio de transporte |
| Trazabilidad y seguridad | → Información de la operación |

Tabla 3. Correlación aplicación-grupo de tecnologías

(Fuente: Elaboración propia)

Identificadas las principales aplicaciones de las nuevas tecnologías en las operaciones de transporte sería posible ahora realizar una comparación entre ellas, puesto que son “unidades” al mismo nivel.

Queda solucionar el problema de la situación temporal entre las tecnologías. Para ello se va a establecer un criterio de selección mixto relacionado con el horizonte temporal de aplicación de la tecnología en cuestión. Este criterio es mixto porque se van a utilizar dos

indicadores que hacen referencia a la madurez de la tecnología, pero proporcionados por distintas fuentes:

- *Technology Readiness Level* (TRL): para su evaluación se utiliza una escala de 9 valores, yendo desde el 1 (principios básicos de la tecnología observados) hasta el 9 (utilizada con éxito); pero en este trabajo se va a utilizar la escala propuesta en el proyecto NextNet de solamente 4 valores (A-B-C-D). La relación entre escalas y el significado de todos sus valores se adjunta en la Tabla 4:

| TRL TRADICIONAL | | TRL PROYECTO NEXTNET | |
|-----------------|---|----------------------|------------------------------|
| VALOR | SIGNIFICADO | VALOR | SIGNIFICADO |
| 1 | Principios básicos observados | D | Investigación básica |
| 2 | Concepto tecnológico formulado | | |
| 3 | Prueba experimental de concepto | | |
| 4 | Tecnología válida en laboratorio | C | Investigación aplicada |
| 5 | Tecnología válida en entorno relevante | | |
| 6 | Tecnología demostrada en entorno relevante | | |
| 7 | Demostración del prototipo en entorno operativo | B | Lista para lanzar al mercado |
| 8 | Sistema completo y calificado | | |
| 9 | Sistema real probado en entorno operativo | A | Presencia en el mercado |

Tabla 4. Comparación escalas TRL tradicional-NextNet
(Fuente: Elaboración propia a partir del proyecto NextNet [6])

- *Trend Assessment* (TA): en este caso en lugar de valores se utilizan niveles, existiendo únicamente 3. Estos niveles (utilizados en el *Trend Radar* de DHL [3]) cuantifican el horizonte temporal de la tecnología y pueden verse en la Tabla 5:

| NIVEL | SIGNIFICADO |
|-------|---|
| Bajo | La tecnología no se aplicará hasta dentro de un periodo de tiempo >5 años |
| Medio | Se espera que la tecnología se aplique aproximadamente en 5 años |
| Alto | La tecnología ya se aplica o espera aplicarse en un periodo <5 años |

Tabla 5. Escala *Trend Assessment*
(Fuente: Elaboración propia)

La clasificación de las 12 tecnologías estudiadas al inicio de este apartado combinando los dos indicadores propuestos se muestra en la Tabla 6:

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|---|----|----|----|
| TRL | - | CA | B | CB | CA | CB | B | B | A | DC | B | CB |
| DHL | Alto | Alto | Alto | Bajo | Bajo | Alto | Bajo | Alto | - | - | - | - |

Tabla 6. Valores TRL y TA para las tecnologías propuestas
(Fuente: Elaboración propia)

Una vez clasificadas las tecnologías se podrán considerar como comparables aquellas que se encuentren en una situación lo más similar posible. La selección de tecnologías se rige por las siguientes reglas (R):

- **R1.** La tecnología será seleccionada si tiene una valoración alta en uno de los indicadores.
- **R2.** La tecnología será seleccionada si tiene una valoración similar y aceptable en ambos indicadores.
- **R3.** En caso de que exista discrepancia entre ambos indicadores, la tecnología no será seleccionada.

2. Descripción del problema

Así pues, las tecnologías comparables en términos temporales resultan las 7 siguientes:

- Realidad aumentada
- *Data science*
- *Internet of things*
- Logística en la nube
- Dispositivos móviles y portátiles
- Tecnologías de identificación
- Sistemas alternativos de propulsión

Las tecnologías mostradas en la anterior lista son ahora comparables, por lo que a partir de ahora puede aplicarse cualquier método de decisión que ayude a elegir cuáles de ellas optimizan la operación de transporte estudiada. En este caso la optimización se busca desde un punto de vista empresarial, es decir, se busca que la optimización de la operación de transporte aporte los mayores beneficios y mejoras para la empresa. Para ello se van a comparar las aplicaciones mencionadas en la Tabla 3 evaluando las tecnologías que en cada una de ellas se utilizan. Se muestran a continuación los usos concretos de las tecnologías seleccionadas en cada una de las aplicaciones propuestas (ALT):

ALT1) Sistema de propulsión del vehículo. En todo lo relacionado con la propulsión del vehículo, la tecnología con más afección es la propia tecnología de propulsión utilizada (descritas en el Anexo 1), pero, además, se pueden encontrar contribuciones de otras tecnologías como las siguientes:

- La recolección de datos relacionados con los consumos y emisiones del vehículo es muy importante a la hora de evaluar la calidad de la operación. Para esto la *Data Science* puede ser una gran alternativa.
- Una vez se disponen de datos de la operación, estos pueden analizarse y compartirse (dentro de la propia empresa o bien públicamente) para encontrar anomalías a corregir o datos que indiquen una buena praxis medioambiental. Una manera muy fácil de compartir estos datos es mediante la conocida nube (*Cloud Logistics*).

ALT2) Optimización de rutas. En el campo de la planificación de operaciones de transporte la tarea de planificar la ruta a seguir es el eje principal, por lo que su optimización cobra una gran importancia ya que puede conducir a un ahorro considerable de recursos (económicos, materiales y humanos). En cualquier optimización de rutas, las tecnologías seleccionadas intervienen de distintas formas:

- El punto de partida para cualquier optimización de rutas es la disposición de datos a partir de los cuales analizar las distintas posibilidades de transporte y elegir la más idónea. Estos datos se recogen por medio de sensores, satélites y otros medios (en los cuales no va a profundizarse), pero lo más importante sobre ellos es su almacenamiento y posterior tratamiento. El almacenamiento en la nube, la *Data science* y el *Internet of Things* cobran una gran importancia en esta tarea. Una vez se dispone de los datos necesarios estos se introducen en softwares de planificación de rutas que generan la ruta que mejor se adapta a las condiciones del transporte y reduce costes lo máximo posible.
- Tras disponer de la ruta idónea es necesario que esta se le comunique al transportista. Las formas más comunes de realizar esta tarea son mediante

dispositivos de realidad aumentada incorporados en el interior del vehículo o mediante *wearables* que el propio transportista posee (p.ej. PDAs).

- Una vez se está realizando la ruta puede ocurrir que surjan complicaciones en la misma (carreteras cortadas, atascos, accidentes...). Interviene aquí de nuevo la captura de información y comunicación al usuario tal y como se han explicado anteriormente.

ALT3) Optimización de carga. Íntimamente relacionada con la optimización de la ruta de transporte está la optimización de la carga: qué llevar en el camión y cómo llevarlo.

- Para conocer qué es lo que hay que introducir en el camión se utilizan las tecnologías de identificación. En sus distintas formas permiten conocer el listado de productos que hay que cargar. En el caso de que estén ya cargados, se podría aplicar esta misma tecnología o incluso utilizar datos almacenados en la nube de operaciones anteriores.
- Los softwares de optimización de carga son de gran ayuda en este punto. Junto con equipos de realidad aumentada (mayoritariamente *wearables*) se permite al trabajador realizar una carga del contenedor que optimice tanto el espacio disponible como los posibles movimientos de mercancía a lo largo de la ruta de reparto posterior.
- Una vez realizada la carga del contenedor, recoger información durante el transporte o cuando el vehículo está parado es de gran utilidad para conocer el estado de la mercancía. Aquí intervienen el *Internet of Things* y la *Data science*, encargados de recoger datos procedentes de distintos sensores y almacenarlos de la forma correcta hasta que sean necesarios.

ALT4) Trazabilidad y seguridad. La obtención y análisis de datos a lo largo de toda la operación de transporte es un hecho de gran importancia, puesto que permitirá evaluarla posteriormente de una forma objetiva. Los datos a recoger pueden ser de distintas tipologías: datos de trazabilidad (que indiquen donde se encuentra la carga y en qué condiciones), relacionados con el *smartdriving* (interaccionando con el conductor para reducir sus consumos, emisiones...) o incluso con la propia seguridad de la operación; pero todos ellos tienen una relación con la tecnología común.

- Para recoger todos estos datos se utilizan sensores o dispositivos determinados que después, gracias al *Internet of Things*, serán capaces de interactuar e intercambiar la información obtenida.
- Gracias a la nube todos los datos recogidos pueden ser almacenados de forma adecuada hasta su uso, bien se haga uso de ellos en el momento de la operación (como es el caso del *smartdriving*) o en momentos posteriores a la misma para evaluarla.
- La comunicación al usuario de posibles decisiones que radiquen de estos datos puede realizarse mediante interfaces que utilicen la realidad aumentada (pantallas en el salpicadero del vehículo) o mediante *wearables* que el propio usuario lleve consigo mismo (PDAs, teléfonos inteligentes...).

3. Planteamiento teórico

La toma de decisiones es una de las actividades más importantes en el desarrollo de cualquier proyecto o trabajo como el presente. Habitualmente las técnicas utilizadas para ello se basan en decisiones personales y subjetivas que pueden producir incertidumbre en el resultado final. La aplicación de otros métodos, de base objetiva y jerárquica, como el Procedimiento Analítico Jerárquico (AHP) hace que la decisión final tenga mayor firmeza y seguridad.

3.1. Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

El AHP es una de las herramientas utilizadas en situaciones en las que se ha de tomar una decisión multicriterio compleja. La técnica utilizada para resolver el problema de decisión es la jerarquización: identificado el objetivo en el vértice superior de la jerarquía se representan en la base de esta los distintos criterios (cualitativos y cuantitativos) con sus respectivos pesos en base a los cuales se va a tomar la decisión final.

Este procedimiento de decisión fue propuesto por Thomas L. Saaty en 1980 [28] y su desarrollo está formado por las siguientes partes:

- Estructuración del problema: identificación del objetivo, definición de criterios y subcriterios e identificación de alternativas.
- Análisis cualitativo: construcción de las matrices.
- Análisis cuantitativo: operación de las matrices.
- Análisis de los resultados.

La explicación del procedimiento de cada una de las fases citadas antes se encuentra correctamente detallada en el Anexo 2 de este documento.

3.2. Jerarquía. Construcción y descripción

3.2.1. Construcción

Independientemente del tipo de operación de transporte que se estudie, todas las aplicaciones citadas en el apartado 2.2 van a estar siempre presentes. Lo que cobra interés ahora es saber cuál de estas aplicaciones es la más influyente en la optimización de la operación en cuestión, es decir, en cuál de ellas se priorizará invertir los recursos disponibles para mejorar el servicio.

El objetivo final es la optimización de la operación de transporte, es decir, convertir la operación en lo más efectiva posible. Se entiende efectividad como una combinación de eficacia y eficiencia.

- **Eficacia:** se refiere al grado de consecución de una tarea, en este caso, de la operación de transporte.
- **Eficiencia:** supone conseguir unos resultados máximos a partir de unos recursos mínimos.
- **Efectividad:** es la mezcla de los dos criterios anteriores. Hace referencia a la consecución total de una tarea utilizando los menores recursos posibles.

Teniendo en cuenta el objetivo mencionado, se han establecido 4 criterios (C1: Económico, C2: Social, C3: Medioambiental y C4: Tecnológico) en el segundo nivel de la jerarquía y 9 subcriterios para el tercero.

| | |
|----------------|-------------------------------|
| ECONÓMICO | Inversión |
| | Coste de mantenimiento |
| | Ahorro |
| SOCIAL | Aceptación social |
| | Mejora condiciones de trabajo |
| | Capacitación del personal |
| MEDIOAMBIENTAL | Emisiones |
| | Congestión |
| TECNOLÓGICO | Madurez de la tecnología |
| | Cambio tecnológico |
| | Optimización operativa |

Tabla 7. Elementos de la jerarquía
(Fuente: Elaboración propia)

La jerarquía propuesta se muestra en la siguiente figura:

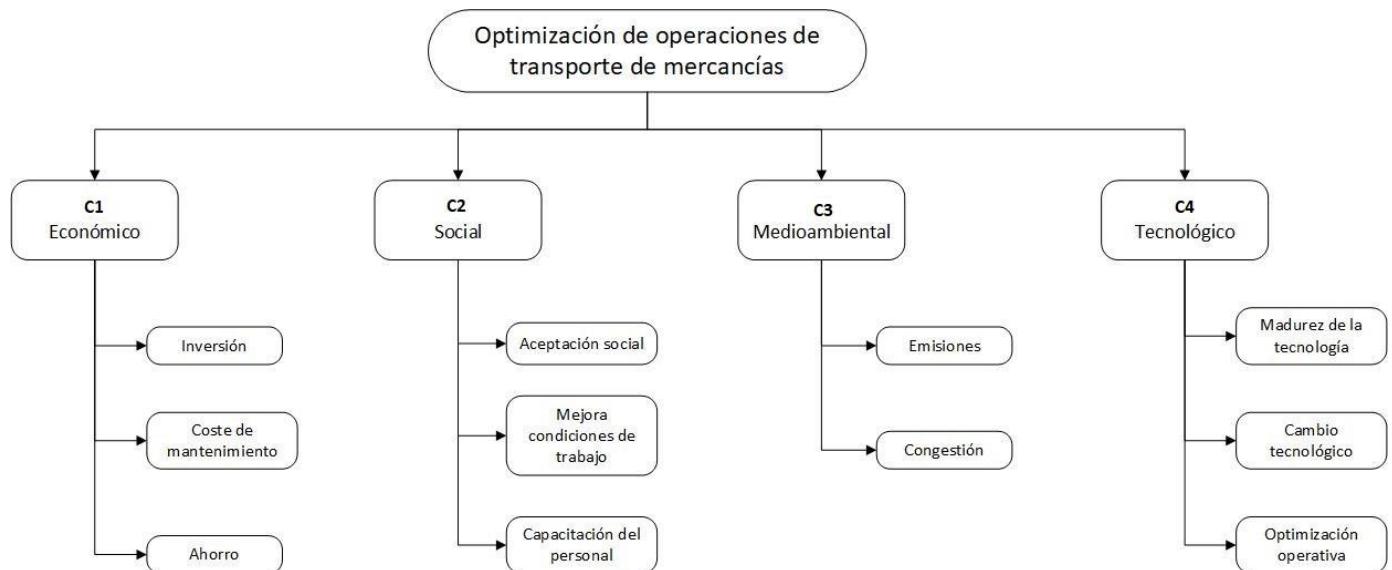


Figura 18. Jerarquía propuesta
(Fuente: Elaboración propia)

3.2.2. Descripción

En las próximas líneas se explica detalladamente cada uno de los elementos que componen la jerarquía.

CRITERIOS (Elementos de primer nivel)

C1. Económico: este criterio engloba todas aquellas características que puedan influir en los resultados económicos de la empresa a la hora de implantar una nueva tecnología que optimice sus operaciones de transporte.

3. Planteamiento teórico

C2. Social: este criterio integra aquellas características que pueden dar o quitar valor a la tecnología, dada su influencia en los usuarios.

C3. Medioambiental: este criterio aúna las características que pueden influir, bien positiva o bien negativamente, en el medioambiente debido a la implantación de determinadas tecnologías.

C4. Tecnológico: este criterio lo constituyen las características tecnológicas que poseen las tecnologías utilizadas en la optimización de operaciones, que pueden ser la base de las decisiones tomadas de cara a la implantación o no de estas últimas.

SUBCRITERIOS (Elementos de segundo nivel)

SC1.1. Inversión: este subcriterio reúne todos aquellos costes e inversiones que deben ser realizados antes de la puesta en marcha del conjunto de tecnologías.

SC1.2. Coste de mantenimiento: este subcriterio engloba todos aquellos desembolsos necesarios para mantener la tecnología a un nivel operativo correcto (mantenimiento, adecuación, actualización...).

SC1.3. Ahorro: este subcriterio se refiere al beneficio económico obtenido debido a la aplicación de tecnologías. Es decir, dependiendo de las características de la inversión y los costes de mantenimiento; el dinero que la empresa ahorraría (y por tanto podría entenderse como un beneficio) frente a la situación de no implantar ninguna tecnología u otra de características distintas totalmente.

SC2.1. Aceptación social: este subcriterio se refiere al grado de aceptación mostrado por parte de los usuarios que se ven afectados por la introducción de nuevas tecnologías en sus puestos de trabajo.

SC2.2. Mejora condiciones de trabajo: este subcriterio se refiere a si las condiciones de trabajo del personal afectado por la implantación de nuevas tecnologías en sus funciones se ven o no mejoradas.

SC2.3. Capacitación del personal: este subcriterio mide la necesidad de capacitar al personal para utilizar las tecnologías a implantar. Dependiendo de la dificultad de la tecnología en cuestión esta capacitación será necesaria o no.

SC3.1. Emisiones: este subcriterio hace referencia a la huella de carbono que tenía la empresa frente a la que tendría tras la implantación del conjunto de tecnologías.

SC3.2. Congestión: este subcriterio alude a la congestión de tráfico que se presenta (bien en carreteras o en ciudades, polígonos...) tras la aplicación del conjunto de tecnologías seleccionado.

SC4.1. Madurez de la tecnología: este subcriterio describe cómo de preparada está la tecnología en cuestión para ser implantada.

SC4.2. Cambio tecnológico: este subcriterio hace referencia al cambio que se da en la empresa a nivel tecnológico, tomando como situación inicial antes de implantar la tecnología y como situación final tras ser implantada.

SC4.3. Optimización operativa: este último subcriterio se refiere al grado de optimización que se consigue al implantar la tecnología o el conjunto de estas. Es decir, si tras implantar estas los recursos de los que disponía previamente la empresa pueden utilizarse de una forma más eficiente.

3.3. Evaluación del modelo jerárquico

Una vez definida la jerarquía, un grupo de 5 expertos pertenecientes a empresas u organizaciones relacionadas con el sector del transporte como Carreras Grupo Logístico, Marcotran, ZLC (Zaragoza Logistics Center) e ITA (Instituto Tecnológico de Aragón), determinó para cada uno de los niveles, la importancia de cada uno de los criterios propuestos frente a los demás (en su mismo nivel). Para ello se proporcionó al grupo de expertos un cuestionario de evaluación (adjunto en el Anexo 3), cuyos datos se recogieron y pusieron en común posteriormente.

Las valoraciones de todos los expertos se realizaron siguiendo la escala de comparación por pares de Saaty.

| ESCALA | SIGNIFICADO | RECÍPROCO |
|------------|---|--------------------|
| 1 | Ambos criterios tienen la misma importancia | 1 |
| 3 | El criterio A es moderadamente más importante que el B | 1/3 |
| 5 | El criterio A tiene una importancia fuerte sobre B | 1/5 |
| 7 | El criterio A tiene una importancia muy fuerte sobre B | 1/7 |
| 9 | El criterio A tiene una importancia extremadamente fuerte sobre B | 1/9 |
| 2, 4, 6, 8 | Valores intermedios a la escala propuesta | 1/2, 1/4, 1/6, 1/8 |

Tabla 8. Valores escala de Saaty

(Fuente: Saaty 1980 [28])

Los datos de las valoraciones individuales de todos los expertos están recogidos en el Anexo 4.

La jerarquía establecida en el apartado anterior se introdujo en el software *SuperDecisions*, y se muestra en la siguiente figura:

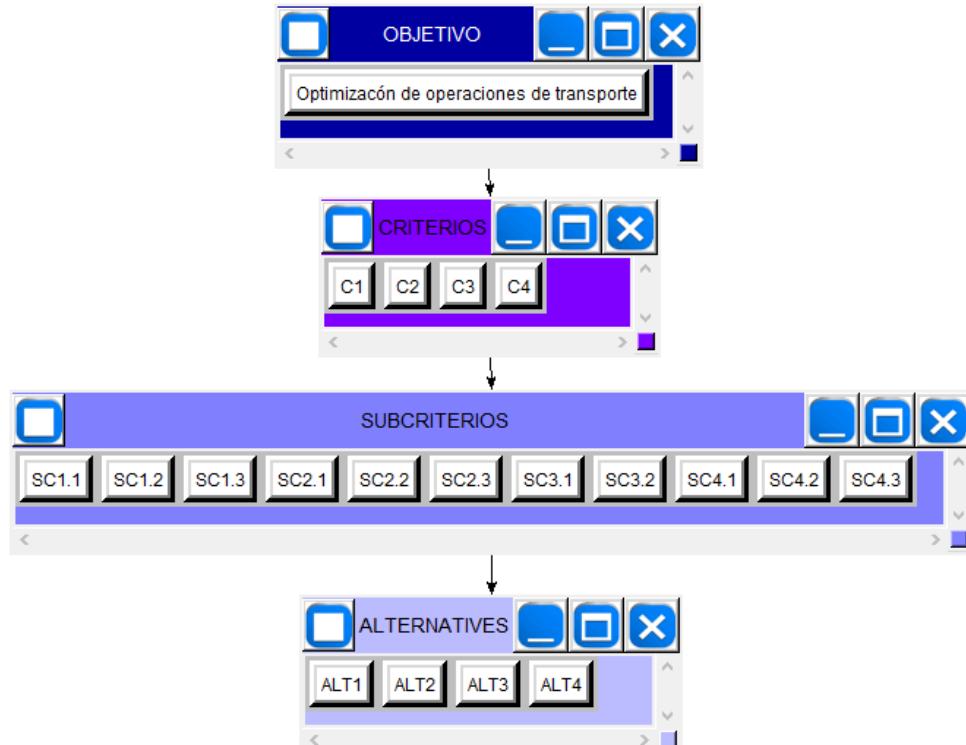


Figura 19. Jerarquía en el software *SuperDecisions*
(Fuente: Elaboración propia)

3. Planteamiento teórico

Para poder proceder al análisis definitivo, previamente se analizaron todas las respuestas ofrecidas por los expertos de manera individual para obtener un resultado global con el que poder trabajar. El proceso de análisis y sus resultados finales se explican en el siguiente apartado.

4. Resultados y análisis de sensibilidad

4.1. Resultados

El punto de partida para realizar el análisis, que nos permitirá conocer en qué medida permiten optimizar una operación de transporte las alternativas propuestas, es las valoraciones obtenidas para cada experto a través del correspondiente cuestionario. Es necesario llegar a una valoración final que pueda introducirse en el software para obtener el resultado final. Para ello se siguió el siguiente proceso:

- Se calculó el vector propio y el ratio de consistencia de cada una de las matrices (16 para cada experto, 80 en total).
- Para aquellas matrices inconsistentes ($CR < 0.10$) se aplicó el proceso de linealización propuesto en Benítez et. al (2014) [29].
- Se agregaron todos los juicios de los expertos por medio de la media geométrica.
- Se calculó el vector normalizado local para cada una de las comparaciones propuestas.

A continuación, se incluye, para cada una de las matrices de comparación, el vector propio de cada uno de los expertos (correspondiente a la matriz tras la linealización si ha sido necesaria), la decisión agregada y el vector normalizado local. Este último aparece sombreado.

| | Experto 1 | Experto 2 | Experto 3 | Experto 4 | Experto 5 | Media geométrica | Normalizado |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------|-------------|
| A | 0,5300 | 0,5451 | 0,6072 | 0,0907 | 0,6010 | 0,3666 | 0,4646 |
| B | 0,0665 | 0,0687 | 0,0485 | 0,5604 | 0,0611 | 0,1033 | 0,1310 |
| C | 0,1461 | 0,1931 | 0,1015 | 0,2965 | 0,1582 | 0,1741 | 0,2207 |
| D | 0,2575 | 0,1931 | 0,2427 | 0,0524 | 0,1797 | 0,1449 | 0,1837 |

Tabla 9. Vectores propios y vector global para criterios de primer nivel

| | Experto 1 | Experto 2 | Experto 3 | Experto 4 | Experto 5 | Media geométrica | Normalizado |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------|-------------|
| SC1.1 | 0,2160 | 0,1684 | 0,0909 | 0,1179 | 0,1214 | 0,1365 | 0,1481 |
| SC1.2 | 0,1356 | 0,2568 | 0,4545 | 0,6410 | 0,2715 | 0,3076 | 0,3338 |
| SC1.3 | 0,6484 | 0,5747 | 0,4545 | 0,2411 | 0,6071 | 0,4774 | 0,5181 |

Tabla 10. Vectores propios y vector local para subcriterios del criterio C1

| | Experto 1 | Experto 2 | Experto 3 | Experto 4 | Experto 5 | Media geométrica | Normalizado |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------|-------------|
| SC2.1 | 0,1404 | 0,1429 | 0,7854 | 0,1684 | 0,1047 | 0,1944 | 0,2322 |
| SC2.2 | 0,6171 | 0,4286 | 0,1488 | 0,5747 | 0,6370 | 0,4283 | 0,5166 |
| SC2.3 | 0,2428 | 0,4286 | 0,0658 | 0,2569 | 0,2583 | 0,2145 | 0,2563 |

Tabla 11. Vectores propios y vector local para subcriterios del criterio C2

| | Experto 1 | Experto 2 | Experto 3 | Experto 4 | Experto 5 | Media geométrica | Normalizado |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------|-------------|
| SC3.1 | 0,7500 | 0,2481 | 0,5000 | 0,0991 | 0,1250 | 0,2584 | 0,3031 |
| SC3.2 | 0,2500 | 0,7519 | 0,5000 | 0,9009 | 0,8750 | 0,5942 | 0,6969 |

Tabla 12. Vectores propios y vector local para subcriterios del criterio C3

4. Resultados y análisis de sensibilidad

| | Experto 1 | Experto 2 | Experto 3 | Experto 4 | Experto 5 | Media geométrica | Normalizado |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------|-------------|
| SC4.1 | 0,2309 | 0,2000 | 0,0667 | 0,1111 | 0,2569 | 0,1545 | 0,1641 |
| SC4.2 | 0,1032 | 0,2000 | 0,4667 | 0,1111 | 0,1684 | 0,1783 | 0,1895 |
| SC4.3 | 0,6658 | 0,6000 | 0,4667 | 0,7778 | 0,5747 | 0,6084 | 0,6464 |

Tabla 13. Vectores propios y vector local para subcriterios del criterio C4

| | Experto 1 | Experto 2 | Experto 3 | Experto 4 | Experto 5 | Media geométrica | Normalizado |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------|-------------|
| ALT1 | 0,5353 | 0,5700 | 0,6396 | 0,6887 | 0,5905 | 0,6025 | 0,6333 |
| ALT2 | 0,2720 | 0,1869 | 0,0626 | 0,0984 | 0,2310 | 0,1486 | 0,1562 |
| ALT3 | 0,1382 | 0,0746 | 0,0626 | 0,1471 | 0,0604 | 0,0895 | 0,0940 |
| ALT4 | 0,0544 | 0,4684 | 0,2351 | 0,0658 | 0,1181 | 0,1109 | 0,1165 |

Tabla 14. Vectores propios y vector global para alternativas referentes a SC1.1

| | Experto 1 | Experto 2 | Experto 3 | Experto 4 | Experto 5 | Media geométrica | Normalizado |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------|-------------|
| ALT1 | 0,6533 | 0,5048 | 0,0679 | 0,7236 | 0,6436 | 0,4015 | 0,4890 |
| ALT2 | 0,1998 | 0,2876 | 0,3899 | 0,1202 | 0,1968 | 0,2212 | 0,2695 |
| ALT3 | 0,1015 | 0,0645 | 0,3899 | 0,1202 | 0,1088 | 0,1273 | 0,1550 |
| ALT4 | 0,0454 | 0,1431 | 0,1524 | 0,0360 | 0,0508 | 0,0710 | 0,0865 |

Tabla 15. Vectores propios y vector global para alternativas referentes a SC1.2

| | Experto 1 | Experto 2 | Experto 3 | Experto 4 | Experto 5 | Media geométrica | Normalizado |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------|-------------|
| ALT1 | 0,5753 | 0,2721 | 0,0679 | 0,4271 | 0,5969 | 0,3066 | 0,3553 |
| ALT2 | 0,2573 | 0,4194 | 0,3899 | 0,1424 | 0,2068 | 0,2622 | 0,3038 |
| ALT3 | 0,1202 | 0,2387 | 0,3899 | 0,3767 | 0,1356 | 0,2246 | 0,2602 |
| ALT4 | 0,0473 | 0,0698 | 0,1524 | 0,0538 | 0,0607 | 0,0697 | 0,0807 |

Tabla 16. Vectores propios y vector global para alternativas referentes a SC1.3

| | Experto 1 | Experto 2 | Experto 3 | Experto 4 | Experto 5 | Media geométrica | Normalizado |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------|-------------|
| ALT1 | 0,6017 | 0,5508 | 0,6132 | 0,7096 | 0,5898 | 0,6109 | 0,6454 |
| ALT2 | 0,2084 | 0,0742 | 0,1574 | 0,0788 | 0,2229 | 0,1337 | 0,1413 |
| ALT3 | 0,1203 | 0,0623 | 0,1574 | 0,1763 | 0,0936 | 0,1143 | 0,1207 |
| ALT4 | 0,0695 | 0,3127 | 0,0721 | 0,0353 | 0,0936 | 0,0876 | 0,0926 |

Tabla 17. Vectores propios y vector global para alternativas referentes a SC2.1

| | Experto 1 | Experto 2 | Experto 3 | Experto 4 | Experto 5 | Media geométrica | Normalizado |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------|-------------|
| ALT1 | 0,4755 | 0,1667 | 0,0596 | 0,0374 | 0,0914 | 0,1100 | 0,1284 |
| ALT2 | 0,2745 | 0,1667 | 0,3825 | 0,5843 | 0,5474 | 0,3545 | 0,4136 |
| ALT3 | 0,1585 | 0,5000 | 0,3825 | 0,1169 | 0,2788 | 0,2506 | 0,2924 |
| ALT4 | 0,0915 | 0,1667 | 0,1753 | 0,2614 | 0,0824 | 0,1419 | 0,1656 |

Tabla 18. Vectores propios y vector global para alternativas referentes a SC2.2

4. Resultados y análisis de sensibilidad

| | Experto 1 | Experto 2 | Experto 3 | Experto 4 | Experto 5 | Media geométrica | Normalizado |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------|-------------|
| ALT1 | 0,4755 | 0,1250 | 0,0625 | 0,6098 | 0,2887 | 0,2307 | 0,2666 |
| ALT2 | 0,2745 | 0,3750 | 0,3125 | 0,2400 | 0,3726 | 0,3103 | 0,3585 |
| ALT3 | 0,1585 | 0,3750 | 0,3125 | 0,0907 | 0,2540 | 0,2120 | 0,2449 |
| ALT4 | 0,0915 | 0,1250 | 0,3125 | 0,0595 | 0,0847 | 0,1125 | 0,1300 |

Tabla 19. Vectores propios y vector global para alternativas referentes a SC2.3

| | Experto 1 | Experto 2 | Experto 3 | Experto 4 | Experto 5 | Media geométrica | Normalizado |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------|-------------|
| ALT1 | 0,6074 | 0,5558 | 0,1753 | 0,7096 | 0,6380 | 0,4848 | 0,5390 |
| ALT2 | 0,2198 | 0,2589 | 0,3825 | 0,1763 | 0,1951 | 0,2371 | 0,2635 |
| ALT3 | 0,1269 | 0,1364 | 0,3825 | 0,0353 | 0,1225 | 0,1234 | 0,1372 |
| ALT4 | 0,0459 | 0,0489 | 0,0596 | 0,0789 | 0,0443 | 0,0542 | 0,0603 |

Tabla 20. Vectores propios y vector global para alternativas referentes a SC3.1

| | Experto 1 | Experto 2 | Experto 3 | Experto 4 | Experto 5 | Media geométrica | Normalizado |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------|-------------|
| ALT1 | 0,6074 | 0,1102 | 0,0318 | 0,0317 | 0,0384 | 0,0764 | 0,0929 |
| ALT2 | 0,2198 | 0,6947 | 0,4364 | 0,6931 | 0,6518 | 0,4963 | 0,6037 |
| ALT3 | 0,1269 | 0,1003 | 0,4364 | 0,0709 | 0,2084 | 0,1524 | 0,1853 |
| ALT4 | 0,0459 | 0,0949 | 0,0953 | 0,2043 | 0,1014 | 0,0970 | 0,1180 |

Tabla 21. Vectores propios y vector global para alternativas referentes a SC3.2

| | Experto 1 | Experto 2 | Experto 3 | Experto 4 | Experto 5 | Media geométrica | Normalizado |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------|-------------|
| ALT1 | 0,1416 | 0,5222 | 0,7158 | 0,1356 | 0,5954 | 0,3359 | 0,4002 |
| ALT2 | 0,3089 | 0,1998 | 0,0532 | 0,3823 | 0,1912 | 0,1888 | 0,2250 |
| ALT3 | 0,3089 | 0,0781 | 0,0532 | 0,1448 | 0,0954 | 0,1121 | 0,1336 |
| ALT4 | 0,2407 | 0,1998 | 0,1779 | 0,3373 | 0,1179 | 0,2025 | 0,2412 |

Tabla 22. Vectores propios y vector global para alternativas referentes a SC4.1

| | Experto 1 | Experto 2 | Experto 3 | Experto 4 | Experto 5 | Media geométrica | Normalizado |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------|-------------|
| ALT1 | 0,6893 | 0,3229 | 0,4564 | 0,6790 | 0,5781 | 0,5250 | 0,5626 |
| ALT2 | 0,1264 | 0,2453 | 0,1017 | 0,0560 | 0,1729 | 0,1250 | 0,1340 |
| ALT3 | 0,1264 | 0,1864 | 0,1017 | 0,0970 | 0,0998 | 0,1183 | 0,1268 |
| ALT4 | 0,0579 | 0,2543 | 0,3402 | 0,1680 | 0,1492 | 0,1647 | 0,1765 |

Tabla 23. Vectores propios y vector global para alternativas referentes a SC4.2

| | Experto 1 | Experto 2 | Experto 3 | Experto 4 | Experto 5 | Media geométrica | Normalizado |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------|-------------|
| ALT1 | 0,1192 | 0,0772 | 0,0364 | 0,0374 | 0,0446 | 0,0562 | 0,0604 |
| ALT2 | 0,3027 | 0,4562 | 0,3977 | 0,5843 | 0,4960 | 0,4369 | 0,4701 |
| ALT3 | 0,5248 | 0,3707 | 0,3977 | 0,1169 | 0,3255 | 0,3118 | 0,3354 |
| ALT4 | 0,0533 | 0,0958 | 0,1681 | 0,2614 | 0,1338 | 0,1246 | 0,1341 |

Tabla 24. Vectores propios y vector global para alternativas referentes a SC4.3

4. Resultados y análisis de sensibilidad

Realizado el análisis matemático se han obtenido 16 vectores normalizados (sombreados en las Tablas 9 a 16), que serán los que se introduzcan en las comparaciones del software *SuperDecisions* para posteriormente obtener los pesos de cada uno de los elementos de la jerarquía.

La Figura 20 muestra la manera de introducir el vector global y la obtención de pesos en el *SuperDecisions*. En este caso se ha utilizado como ejemplo la comparación de los criterios de primer nivel y, como puede observarse, el peso de cada uno de los criterios coincide con el valor introducido puesto que al software se le ha proporcionado un vector ya normalizado.

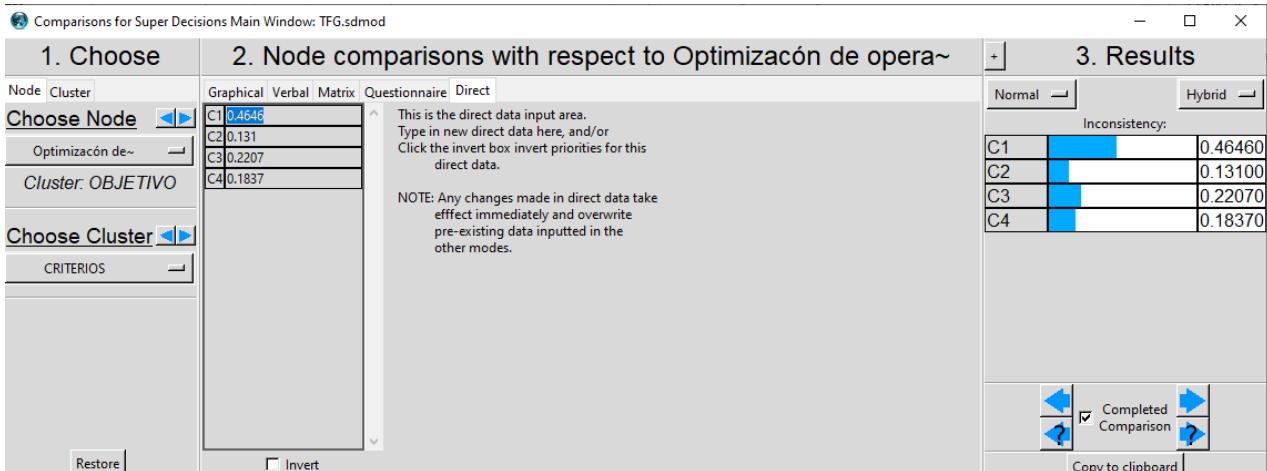


Figura 20. Introducción de vector propio y obtención de pesos en *SuperDecisions*
(Fuente: Elaboración propia)

Una vez que se han introducido todos los vectores propios en el software es ahora cuando se está en condiciones de conocer el peso global de cada alternativa. Este puede calcularse con la fórmula:

$$P_{global} = \sum P_{local_{alternativa}} \cdot P_{subcriterio} \cdot P_{criterio} = P_{local_{alternativa}} \cdot P_{global} \quad (Ec. 1)$$

En la siguiente tabla se recogen de forma resumida los pesos locales y el peso global para cada una de las alternativas.

| | C1 (46,46%) | | | C2 (13,10%) | | | C3 (22,07%) | | C4 (18,37%) | | |
|---------------------|----------------|-------|-------|----------------|-------|-------|----------------|-------|----------------|-------|-------|
| | SC1.1 | SC1.2 | SC1.3 | SC2.1 | SC2.2 | SC2.3 | SC3.1 | SC3.2 | SC4.1 | SC4.2 | SC4.3 |
| P_{local} (%) | 14,81 | 33,38 | 51,81 | 23,22 | 51,16 | 25,63 | 30,31 | 69,69 | 16,41 | 18,95 | 64,64 |
| P_{global} (%) | 6,88 | 15,51 | 24,07 | 3,04 | 6,70 | 3,36 | 6,69 | 15,38 | 3,01 | 3,48 | 11,87 |
| ALT1 (%) | 63,33 | 48,90 | 35,53 | 64,54 | 12,84 | 26,66 | 53,90 | 9,29 | 40,02 | 56,26 | 6,04 |
| ALT2 (%) | 15,62 | 26,95 | 30,38 | 14,13 | 41,36 | 35,85 | 26,35 | 60,37 | 22,50 | 13,40 | 47,01 |
| ALT3 (%) | 9,40 | 15,50 | 26,02 | 12,07 | 29,24 | 24,49 | 13,72 | 18,53 | 13,36 | 12,68 | 33,54 |
| ALT4 (%) | 11,65 | 8,65 | 8,07 | 9,26 | 16,56 | 13,00 | 6,03 | 11,80 | 24,12 | 17,65 | 13,41 |

Tabla 25. Matriz de decisión
(Fuente: Elaboración propia)

Aplicando la fórmula de la ecuación 1 pueden obtenerse manualmente los pesos finales de cada alternativa, quedando estos:

Alternativa 1 (ALT 1)

$$\begin{aligned}
 &= 0.6333 \cdot 0.0688 + 0.4890 \cdot 0.1551 + 0.3553 \cdot 0.2407 + 0.6454 \cdot 0.0304 \\
 &+ 0.1284 \cdot 0.0670 + 0.2666 \cdot 0.0336 + 0.5390 \cdot 0.0669 + 0.0929 \cdot 0.1538 \\
 &+ 0.4002 \cdot 0.0301 + 0.5626 \cdot 0.0348 + 0.0604 \cdot 0.1187 = 0.3313
 \end{aligned}$$

Alternativa 2 (ALT 2)

$$\begin{aligned}
 &= 0.1562 \cdot 0.0688 + 0.2695 \cdot 0.1551 + 0.3038 \cdot 0.2407 + 0.1413 \cdot 0.0304 \\
 &+ 0.4136 \cdot 0.0670 + 0.3585 \cdot 0.0336 + 0.2635 \cdot 0.0669 + 0.6037 \cdot 0.1538 \\
 &+ 0.2250 \cdot 0.0301 + 0.1340 \cdot 0.0348 + 0.4701 \cdot 0.1187 = 0.3475
 \end{aligned}$$

Alternativa 3 (ALT 3)

$$\begin{aligned}
 &= 0.0094 \cdot 0.0688 + 0.1550 \cdot 0.1551 + 0.2602 \cdot 0.2407 + 0.1207 \cdot 0.0304 \\
 &+ 0.2924 \cdot 0.0670 + 0.2449 \cdot 0.0336 + 0.1372 \cdot 0.0669 + 0.1853 \cdot 0.1538 \\
 &+ 0.1336 \cdot 0.0301 + 0.1268 \cdot 0.0348 + 0.3354 \cdot 0.1187 = 0.2105
 \end{aligned}$$

Alternativa 4 (ALT 4)

$$\begin{aligned}
 &= 0.1165 \cdot 0.0688 + 0.0865 \cdot 0.1551 + 0.0807 \cdot 0.2407 + 0.0926 \cdot 0.0304 \\
 &+ 0.1656 \cdot 0.0670 + 0.1300 \cdot 0.0336 + 0.0603 \cdot 0.0669 + 0.1180 \cdot 0.1538 \\
 &+ 0.2412 \cdot 0.0301 + 0.1765 \cdot 0.0348 + 0.1341 \cdot 0.1187 = 0.1107
 \end{aligned}$$

Los pesos globales para cada alternativa quedan entonces:

| | |
|---------------|--------|
| Alternativa 1 | 33.13% |
| Alternativa 2 | 34.75% |
| Alternativa 3 | 21.05% |
| Alternativa 4 | 11.07% |

Tabla 26. Pesos globales de las alternativas (cálculo manual)
(Fuente: Elaboración propia)

Por otra parte, también es posible obtener el resultado final del análisis en el propio software. Sintetizando el modelo introducido en este, se obtiene:

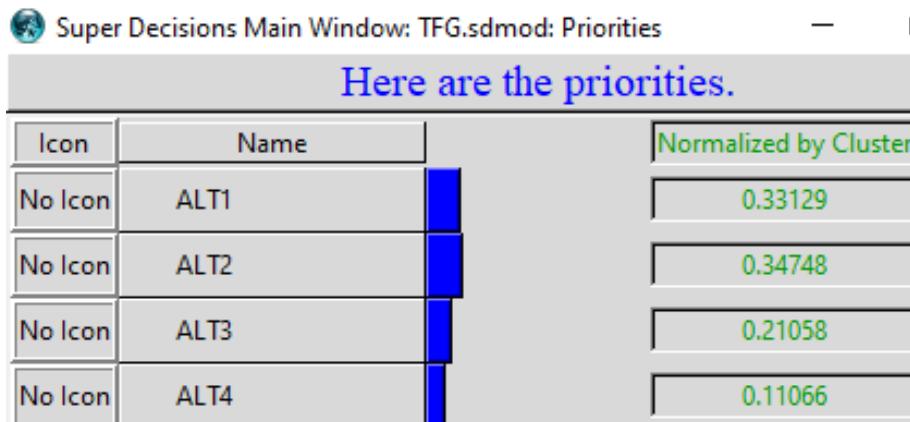


Figura 21. Resultado del análisis obtenido en SuperDecisions
(Fuente: Elaboración propia)

Tal y como puede observarse comparando con la Tabla 26, los resultados obtenidos a través del software son los esperados.

4. Resultados y análisis de sensibilidad

Así pues, se tiene que la alternativa 2 “Optimización de ruta” es la preferida para optimizar operaciones de transporte de mercancías con un peso de 34,74%. A esta le siguen la alternativa 1 “Sistema de propulsión del vehículo”, la alternativa 3 “Optimización de carga” y la alternativa 4 “Trazabilidad y seguridad” con 33,12%; 21,05% y 11,06% respectivamente.

4.2. Análisis de sensibilidad

A partir de estos datos puede plantearse un análisis de sensibilidad variando los pesos de los criterios y subcriterios más significativos, para ver como esto afectaría al resultado final del análisis. El análisis de sensibilidad se ha realizado con el módulo de sensibilidad de *SuperDecisions*, mismo software utilizado en el análisis principal.

En primer lugar, se plantea la posibilidad de variar el peso de los criterios de primer nivel, obteniendo así los siguientes resultados:

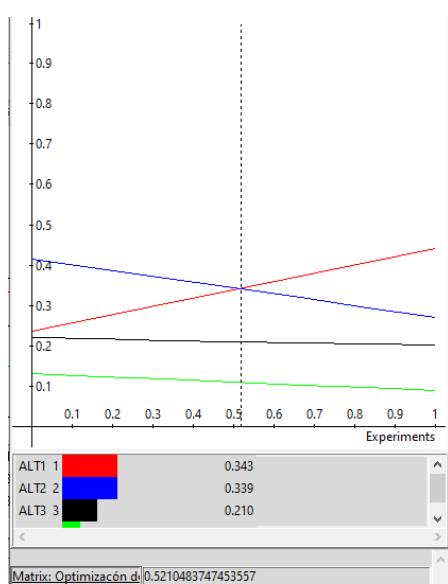


Figura 22. Sensibilidad del modelo a variaciones de C1

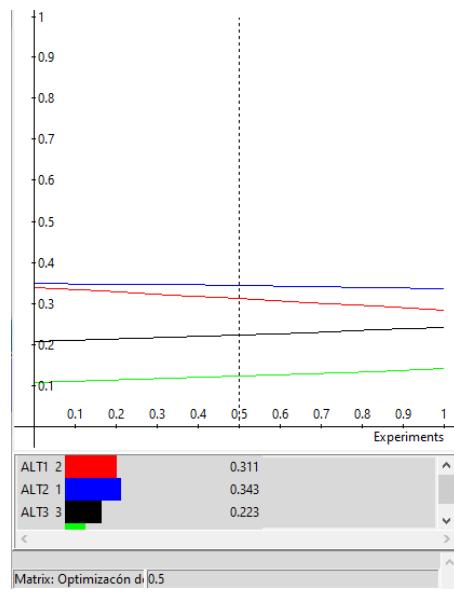


Figura 23. Sensibilidad del modelo a variaciones de C2

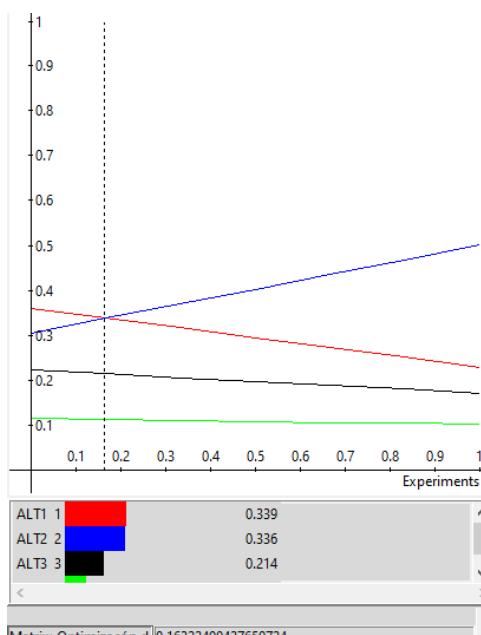


Figura 24. Sensibilidad del modelo a variaciones de C3

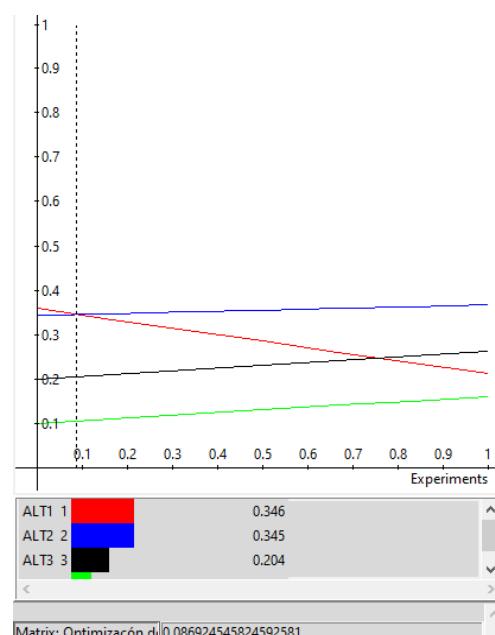


Figura 25. Sensibilidad del modelo a variaciones de C4

4. Resultados y análisis de sensibilidad

La variación de los pesos de los criterios C1, C3 y C4 afecta de forma evidente a la sensibilidad del modelo como se muestra en las Figuras 22, 24 y 25. Sin embargo, la variación del peso del criterio C2 no afecta a los resultados.

- Para un peso del criterio $C1 < 52\%$ se tiene un *ranking* de alternativas ALT2 – ALT1 – ALT3 – ALT4 (situación final de este TFG); mientras que para un peso superior a este valor los dos primeros lugares del *ranking* se intercambiarían.
- Para un peso del criterio $C3 < 16,3\%$ se tiene un *ranking* de alternativas ALT1 – ALT2 – ALT3 – ALT4; mientras que para valores superiores los dos primeros lugares del *ranking* se intercambiarían (situación final de este TFG).
- Para un peso del criterio $C4 < 8,7\%$ el *ranking* obtenido sería ALT1 – ALT2 – ALT3 – ALT4. Para un peso entre este último valor y un 75%, el *ranking* resultaría ALT2 – ALT1 – ALT3 – ALT4 (situación final de este TFG); y para valores superiores al 75% las posiciones 2 y 3 se intercambiarían.

Para los subcriterios (SC_i) podría plantearse el mismo procedimiento, pero se ha elegido variar únicamente aquellos que recibieron los pesos más significativos por parte de los expertos (SC1.3, SC2.2, SC3.2 y SC4.3). Se tienen así los siguientes resultados:

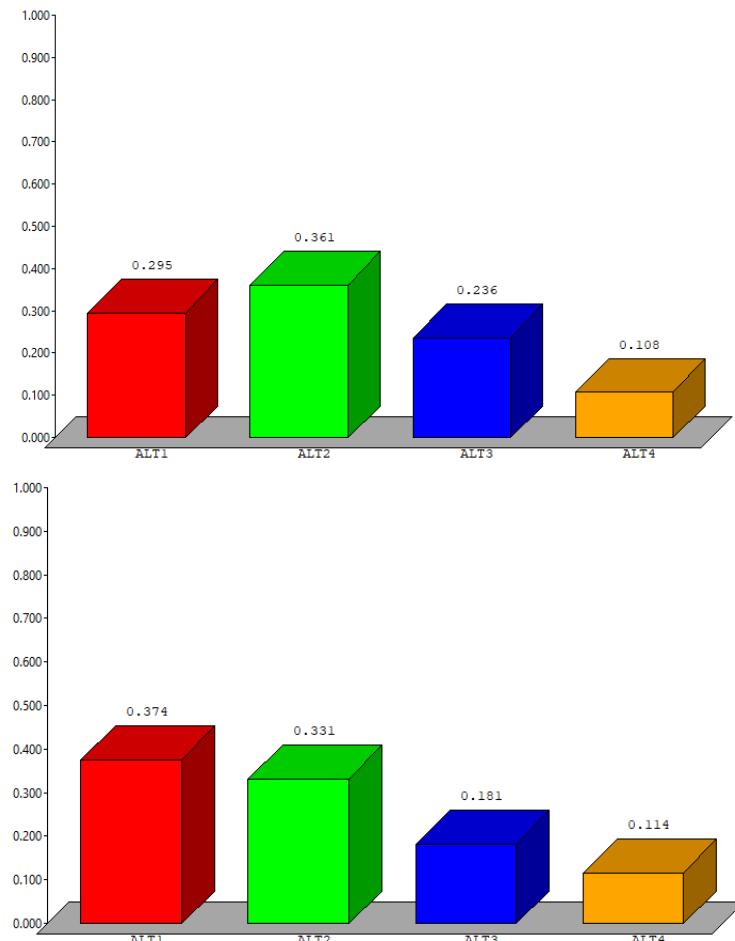


Figura 26. Sensibilidad del modelo a variaciones de SC1.3

4. Resultados y análisis de sensibilidad

En el caso de que se priorizase totalmente SC1.3 (parte superior de la Figura 26), el orden de preferencia de las alternativas no diferiría del que se ha obtenido en un principio. Si en lugar de priorizar este subcriterio se pone en último lugar de prioridad (parte inferior de la Figura 26), la preferencia de las dos primeras alternativas se vería intercambiada.

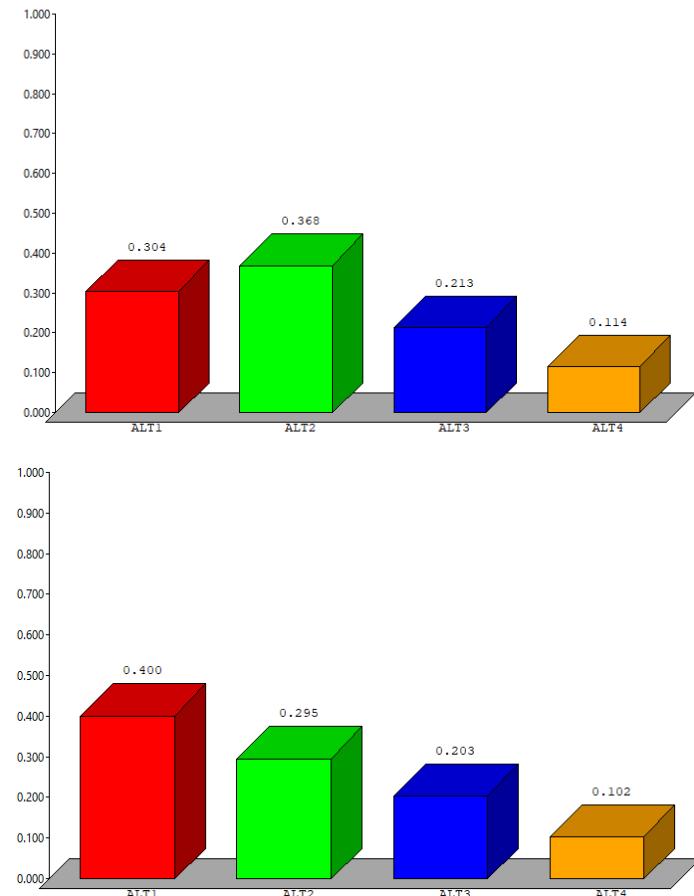


Figura 27. Sensibilidad del modelo a variaciones de SC3.2

Si se variase la prioridad del criterio SC3.2, los resultados serían idénticos a los obtenidos tras variar SC1.3. Las alternativas 1 y 2 son de nuevo las que se disputan el primer puesto del *ranking*.

4. Resultados y análisis de sensibilidad

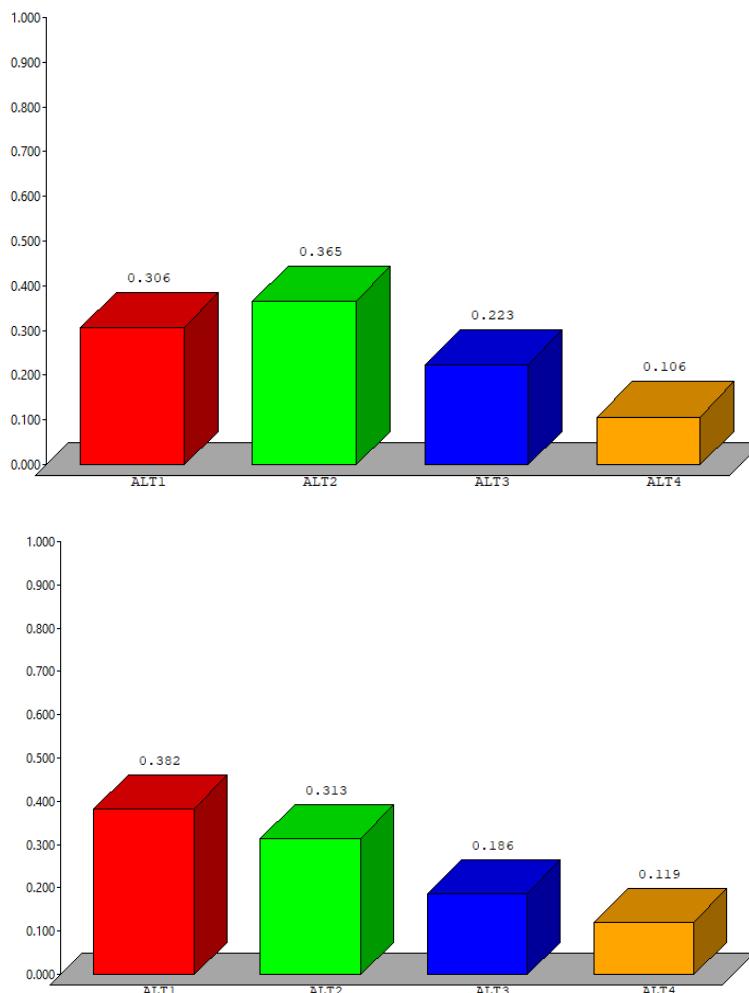
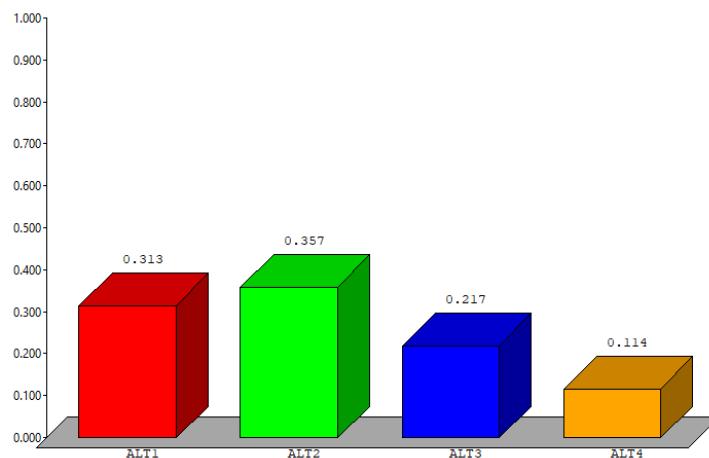


Figura 28. Sensibilidad del modelo a variaciones de SC4.3

De nuevo la situación se repite para el subcriterio SC4.3. La priorización total de este hace que se obtenga el orden de preferencia que se ha obtenido en el análisis de este trabajo, mientras que disminuir su prioridad al mínimo hace que la alternativa 1 sea ahora la preferida.



4. Resultados y análisis de sensibilidad

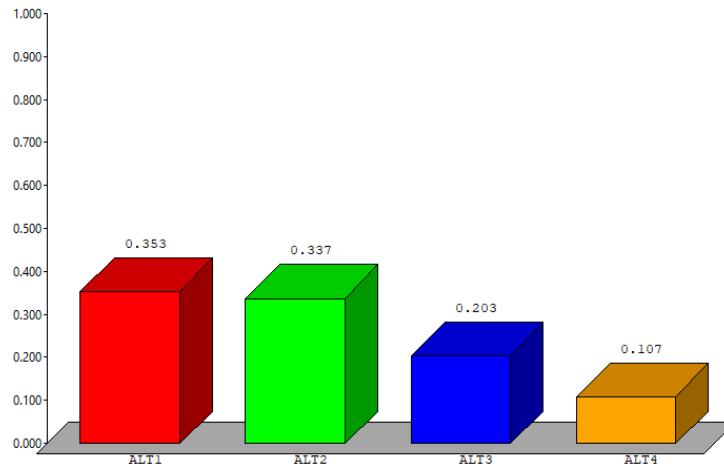


Figura 29. Sensibilidad del modelo a variaciones de SC2.2

La afectación de la variación de la prioridad del subcriterio SC2.2 a los resultados finales del análisis sigue la misma línea que en los tres casos comentados anteriormente.

Finalmente, a la vista de los resultados del análisis de sensibilidad realizado, puede verse que en todas las situaciones propuestas son las alternativas 1 y 2 las que pugnan por la primera posición en el *ranking*.

5. Discusión y conclusiones

El objetivo principal de este TFG es proponer un procedimiento para evaluar la idoneidad de una serie de alternativas candidatas a optimizar operaciones de transporte de mercancías.

Para ello, en primer lugar, se ha realizado un estudio de las tecnologías existentes en el sector del transporte, cuya aplicación puede conseguir optimizar alguna de las fases de las operaciones mencionadas. En una segunda parte, se ha propuesto la evaluación y análisis de dichas tecnologías a través del método AHP para, en un final, poder obtener un *ranking* de preferencia de las alternativas seleccionadas.

La metodología utilizada ha resultado efectiva y ha arrojado como resultado final la siguiente preferencia de alternativas:

- Alternativa 2. Optimización de ruta.
- Alternativa 1. Sistema de propulsión del vehículo.
- Alternativa 3. Optimización de carga.
- Alternativa 4. Trazabilidad y seguridad.

Algunos de los aspectos más destacados de este análisis han sido:

- El criterio (C_i) al que mayor peso otorgaron los expertos fue el criterio C1 – Económico con un 46,46%.
- El criterio con menor peso fue el C2 – Social con un 13,1%.
- Los subcriterios (SC_i) que mayor peso recibieron, para cada uno de los criterios de primer nivel fueron C1.3 – Ahorro (24,07%), C2.2 – Mejora condiciones de trabajo (6,7%), SC3.2 – Congestión (15,38%) y C4.3 – Optimización operativa (11,87%).
- Los subcriterios con menor peso asignado fueron C1.1 – Inversión (6,88%), C2.1 – Aceptación social (3,04%), C3.1 – Emisiones (6,69%) y C4.1 – Madurez de la tecnología (3,01%).

A la vista de los resultados obtenidos se puede concluir que son dos alternativas las que principalmente optimizan las operaciones de transporte de mercancías. En primer lugar, la optimización de rutas y tras ella el uso de sistemas de propulsión alternativos en los vehículos.

La optimización de rutas permite a las empresas de transporte aumentar sus beneficios, ya que estos son proporcionales al número de operaciones de transporte que desarrollan. El uso de sistemas de propulsión alternativos en los vehículos está íntimamente relacionado con la reducción de emisiones. La conciencia medioambiental de las empresas del sector del transporte es cada vez mayor y esta alternativa cobra una gran importancia en sus opciones de optimización.

6. Bibliografía y webgrafía

- [1] “Cadena de suministro.” [Online]. Disponible: <https://www.entrepreneur.com/article/316908>. [Accessed: 14-Nov-2019].
- [2] Ministerio de Fomento, “Observatorio del Transporte y la Logística en España. Informe Anual 2018,” p. 272, 2019.
- [3] DHL Trend Research, “Logistics Trend Radar 2018/2019,” p. 55, 2018.
- [4] “NextNet Project. Flyer.” [Online]. Disponible: https://nextnetproject.eu/wp-content/uploads/2017/11/flyernextnetv6_web.pdf. [Accessed: 14-Nov-2019].
- [5] NextNet Project, “D3.1: Technology Mapping and Scouting,” 2019. [Online]. Disponible: https://nextnetproject.eu/wp-content/uploads/2019/01/Fact-Sheet-D3.1_v2.pdf. [Accessed: 21-Aug-2019].
- [6] R. Fornasiero *et al.*, “D3.1 : Technology Mapping and Scouting,” 2018.
- [7] H. Glockner, K. Jannek, J. Mahn, and B. Theis, *Augmented Reality in Logistics*. 2015.
- [8] “Realidad aumentada en la conducción.” [Online]. Disponible: <https://www.publimetro.com.mx/mx/autosrpm/2018/06/04/continental-digilens-inversion.html>. [Accessed: 15-Nov-2019].
- [9] “Realidad aumentada en almacenes.” [Online]. Disponible: <https://arodriguez.blogs.upv.es/llog-vr-localizando-productos-en-el-almacen-con-realidad-aumentada/>. [Accessed: 15-Nov-2019].
- [10] M. Jeske, M. Grüner, and F. Weiss, “Big Data in Logistics,” *DHL Cust. Solut. Innov.*, no. December, pp. 1–30, 2013.
- [11] “Big Data.” [Online]. Disponible: <https://sdtimes.com/data/big-data-go/>. [Accessed: 14-Nov-2019].
- [12] “Internet of Things.” [Online]. Disponible: <https://www.information-age.com/internet-things-impacting-enterprise-networks-123463122/>. [Accessed: 15-Nov-2019].
- [13] “The long-haul truck of the future.” [Online]. Disponible: <https://www.mercedes-benz.com/en/innovation/the-long-haul-truck-of-the-future/>. [Accessed: 15-Nov-2019].
- [14] “Vehículo autónomo.” [Online]. Disponible: <https://www.eleconomista.es/ecomotor/motor/noticias/8745571/11/17/El-coche-autonomo-utilizara-todas-las-tecnologias-Internet-de-las-Cosas-la-Telefonia-5G-el-laser-radares.html>. [Accessed: 15-Nov-2019].
- [15] “Drones de vigilancia.” [Online]. Disponible: <http://www.seguritecnia.es/actualidad/al-dia/publicadas-las-normas-de-la-ue-sobre-drones>. [Accessed: 15-Nov-2019].
- [16] “Tecnología blockchain.” [Online]. Disponible: <https://www.blockchaineconomia.es/blockchain/>. [Accessed: 15-Nov-2019].
- [17] “Startseite - VIZ.” [Online]. Disponible: <https://viz.berlin.de/>. [Accessed: 15-Nov-2019].
- [18] “Cloud Logistics.” [Online]. Disponible: <https://menaentrepreneur.org/2019/01/reasons-why-logitrade-is-a-good-choice-for-cloud-logistics/>. [Accessed: 15-Nov-2019].
- [19] “Inteligencia artificial.” [Online]. Disponible: <https://www.cooperativa.cl/noticias/sociedad/ciencia/congreso-futuro/congreso-futuro->

- que-es-la-inteligencia-artificial/2019-07-14/112600.html. [Accessed: 15-Nov-2019].
- [20] “PDAs en cabina de camiones.” [Online]. Disponible: <https://es.dreamstime.com/foto-de-archivo-tableta-con-la-navegaci%f3n-en-cabina-del-cam%f3n-durante-la-impuls%f3n-image64490058>. [Accessed: 15-Nov-2019].
- [21] “Wearables de RA en almacenes.” [Online]. Disponible: <https://revistamagazzine.com/camiones/incorpora-dhl-realidad-aumentada-en-su-logistica/>. [Accessed: 15-Nov-2019].
- [22] “Tipos de wearables.” [Online]. Disponible: <https://medium.com/@manasim.letsnurture/rise-of-wearables-and-future-of-wearable-technology-1a4e38a2fbb6>. [Accessed: 15-Nov-2019].
- [23] “El código de barras y el RFID en el almacén.” [Online]. Disponible: <https://www.mecalux.es/manual-almacen/almacen/sistemas-identificacion-automatica>. [Accessed: 25-Jun-2019].
- [24] “RFID.” [Online]. Disponible: <https://www.optimoda.es/logistica/el-rfid-llega-a-gio-web/>. [Accessed: 15-Nov-2019].
- [25] “Passive GPS Vehicle Tracking Devices & Data Logger Systems.” [Online]. Disponible: <https://www.trackyourtruck.com/gps-tracking-devices/passive-tracking/>. [Accessed: 15-Nov-2019].
- [26] “Tecnología platooning.” [Online]. Disponible: <https://www.businesstimes.com.sg/transport/scania-toyota-come-on-board-to-test-bed-truck-platooning-system>. [Accessed: 15-Nov-2019].
- [27] “Tecnología GPS.” [Online]. Disponible: <https://www.youtube.com/watch?v=xE-Fr35UbiA>. [Accessed: 15-Nov-2019].
- [28] T. L. Saaty, “Axiomatic Foundation of the Analytic Hierarchy Process,” *Manage. Sci.*, vol. 32, no. 7, pp. 841–855, 1986.
- [29] J. Benítez, J. Izquierdo, R. Pérez-García, and E. Ramos-Martínez, “A simple formula to find the closest consistent matrix to a reciprocal matrix,” *Appl. Math. Model.*, vol. 38, no. 15–16, pp. 3968–3974, 2014.
- [30] Comunidad de Madrid, “Guía de referencia para la incorporación de Vehículos de Energía Alternativa (VEAs) en actividades profesionales,” 2018.
- [31] I. y C. Ministerio de Economía, “Marco de Acción Nacional de energías alternativas en el transporte,” pp. 1–17, 2017.
- [32] Foro de Empresas por Madrid (2017), “Caracterización de las flotas de vehículos de energía alternativa.”
- [33] R. W. Saaty, “The analytic hierarchy process - What is and how is it used,” vol. 9, no. 3, pp. 161–176, 1987.

Otras referencias consultadas:

M. Jeske, M. Grüner, and F. Weiss, “Big Data in Logistics,” *DHL Cust. Solut. Innov.*, no. December, pp. 1–30, 2013.

J. Macaulay, L. Buckalew, and G. Chung, “Internet of things in Logistics,” 2015.

6. Bibliografía y webgrafía

- K. Zeiler, D. Niegzoda, and G. Ghung, “Self-Driving Vehicles in Logistics,” *DHL Cust. Solut. Innov.*, pp. 1–39, 2014.
- McKinsey & Company, “Distraction or disruption? Autonomous trucks gain ground in US logistics,” *Learn*, no. December, 2018.
- M. Heutger and G. Chung, “Blockchain in Logistics,” *DHL Cust. Solut. Innov.*, pp. 1–28, 2018.
- S. Steck and F. Ortmann, “Low-Cost Sensor Technology,” *DHL Cust. Solut. Innov.*, no. December, p. 24, 2013.
- T. Bonkenburg, “Robotics in Logistics,” *DHL Cust. Solut. Innov.*, no. March, p. 37, 2016.
- B. Gesing, S. J. Peterson, and D. Michelse, *Artificial Intelligence in Logistics*. 2018.
- Professor Graham Davies et al., “Smart materials for the 21st Century,” *Material Foresight*, 2017.
- A. Altuzarra, J. M. Moreno-Jiménez, and M. Salvador, “A Bayesian prioritization procedure for AHP-group decision making,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 182, no. 1, pp. 367–382, Oct. 2007.
- T. L. Saaty and L. Vargas, “Decision making with the analytic network process,” *Proc. 14th Int. Symp. Oper. Res. SOR 2017*, vol. 2017-Septe, no. September 2006, pp. 180–186, 2017.
- J. A. Vallejo-Borda, L. A. Gutiérrez-Bucheli, and J. L. Ponz-Tienda, “Proceso Analítico Jerárquico como metodología de selección. Aplicación para la selección de la mejor alternativa de almacenamiento de agua,” no. February 2016, 2014.
- J. Aznar Bellver and F. Guijarro Martínez, *Nuevos métodos de valoración. Modelos multicriterio*. 2012.
- L. Juan Escrivá and E. Peñalvo Lopez, “Aplicación del proceso analítico jerárquico al dimensionamiento de sistemas renovables,” 2015.
- T. Hurtado and G. Bruno, “El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores,” *Tesis Digit. UNMSM*, vol. 3, p. 100, 2005.
- E. Larrodé, J. M. Moreno-Jiménez, and M. V. Muerza, “An AHP-multicriteria suitability evaluation of technological diversification in the automotive industry,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 50, no. 17, pp. 4889–4907, 2012.

Anexo 1. Sistemas alternativos de propulsión

Los sistemas alternativos de propulsión están hoy en día en auge dado el compromiso con el medioambiente de la sociedad y la industria. En el sector del transporte es una de las líneas de investigación más innovadoras y con mayores avances, y no solo las empresas son las promotoras de estudios e investigaciones, otros órganos como los propios gobiernos nacionales o instituciones europeas también los lideran.

Actualmente las tecnologías de tracción utilizadas (o que se pretenden utilizar en un futuro cercano) en el sector del transporte español son:

- **Gas natural:** el gas natural es un combustible fósil no derivado del petróleo formado por una rica mezcla de hidrocarburos ligeros con el metano (CH_4) como componente principal. Su aplicación en el ámbito del transporte se puede encontrar de 2 formas distintas:
 - **Gas natural comprimido (GNC):** gas en estado gaseoso comprimido a presiones de 200-220 bares. Es la forma más habitual de uso en el sector. En vehículos pesados puede llegar a aportar una autonomía de 500 km.
 - **Gas natural licuado (GNL):** gas en estado líquido almacenado en tanques criogénicos a -162°C y 1 bar. En vehículos pesados puede llegar a aportar una autonomía de 1500 km.
- **Electricidad:** esta nueva tecnología es quizá la más conocida por la sociedad española, pero su implantación se está viendo retrasada por la gran cantidad de barreras a superar, principalmente la falta de infraestructura. Los vehículos eléctricos podrán ser de distintas tipologías:
 - **Eléctrico puro (BEV):** totalmente propulsado por motor eléctrico. Su autonomía dependerá de la capacidad de su batería, actualmente situada entre 130-300 km.
 - **Eléctrico de autonomía extendida (E-REV):** aunque es de propulsión totalmente eléctrica incorpora un pequeño motor térmico que recarga las baterías del motor principal (eléctrico). De esta forma la autonomía puede asemejarse a la de un vehículo de propulsión convencional.
 - **Híbrido enchufable (PHEV):** combina ambas fuentes de propulsión (eléctrica+térmica). La autonomía eléctrica es ligeramente superior a la de un vehículo no enchufable.
 - **Híbrido eléctrico (HEV):** la principal fuente de energía en estos vehículos sigue siendo la térmica, pero incorporan un motor eléctrico que asiste al motor convencional en tareas como *start/stop*, las aceleraciones y frenadas... En modo 100% eléctricos están diseñados para recorrer pequeñas distancias en ciudad.
- **Gas licuado del petróleo (GLP):** mezcla de propano y butano que se usa principalmente en vehículos ligeros, pero puede utilizarse en menor medida en vehículos comerciales.
- **Hidrógeno:** quizá la tecnología menos conocida pero que está presentando un gran desarrollo en los últimos años, aunque su implantación se prevé tardía (inicios en 2025). El hidrógeno como fuente de energía en vehículos está presente en dos formatos:

- Pila de combustible: dispositivo electroquímico que produce energía eléctrica y agua a partir del hidrógeno almacenado y aire. La energía eléctrica producida es la responsable del funcionamiento del vehículo. Estos dispositivos no generan ruido ni vibraciones al no poseer partes móviles como el resto de los motores.
- Motores de combustión interna alternativos (MCI)
- **Biocarburantes**: combustibles de origen renovables líquidos (bioetanol, biodiésel, HVO) o gaseosos (biometano) producidos a partir de biomasas. En España existen 5 tipos:
 - Biodiésel: éster producido a partir de la reacción de aceites vegetales o grasas animales con un alcohol.
 - HVO (hidrobiodiésel): se produce mediante hidrogenación.
 - Bioetanol: alcohol etílico fabricado a partir de fermentación de azúcares en la materia orgánica.
 - BioETEBE: es un aditivo oxigenado formado por bioetanol e isobutanol utilizado principalmente para aumentar el octanaje de las gasolinas.
 - Biogás/biometano: principalmente compuesto por metano (50-65%) y formado por una digestión aerobia o anaeróbica.

En la siguiente figura se muestra esquemáticamente toda la flota de vehículos de energía alternativa (VEAs) explicados anteriormente.

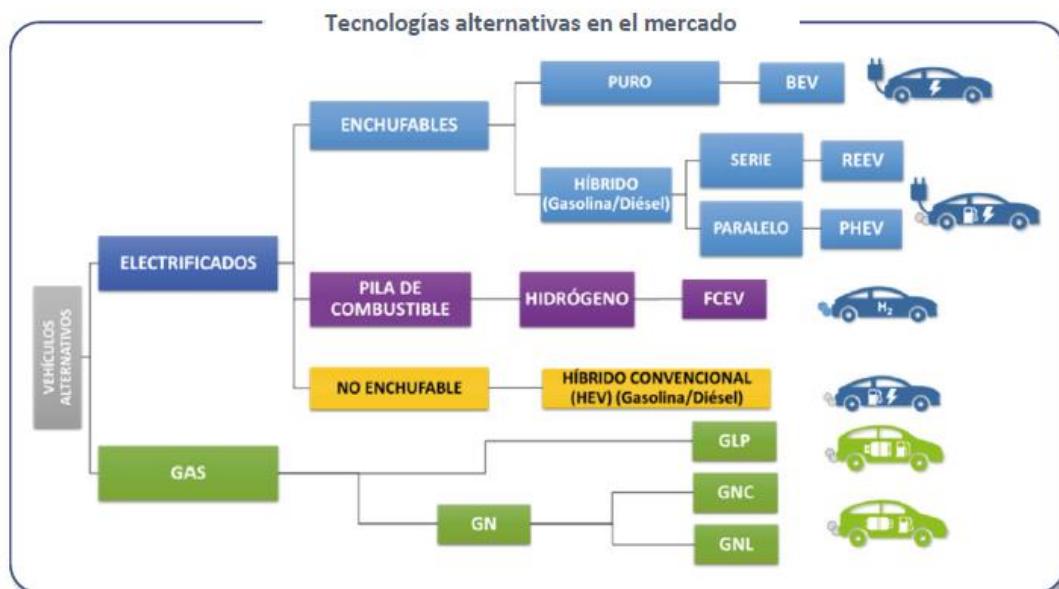


Figura 1. Vehículos de energía alternativa (VEAs)
(Fuente: Guía de referencia para la incorporación de VEAs en actividades profesionales [30])

Desde el Parlamento Europeo se propulsó la Directiva 2014/94/UE, en la cual se requería a todos los Estados miembro de la UE la adopción de un Marco de Acción Nacional (MAN) [31] antes del 18/11/2016 para el desarrollo del mercado respecto a energías alternativas en el sector del transporte. Este documento recopila información sobre el estado de las distintas

tecnologías de tracción con relación a distintos modos de transporte, así como su posible evolución en el sector. Las tecnologías contempladas respecto al transporte por carretera en el MAN son:

- **Gas natural:** actualmente en el mercado en distintos tipos de vehículos:

- Bi-combustible: 2 depósitos independientes, uno de combustible convencional y otro de gas natural. Usan un combustible u otro según disponibilidad.
- Mono-combustible: uso exclusivo de gas natural, pero existe un pequeño depósito de combustible convencional para posibles emergencias.
- Dual: el motor necesita una mezcla de ambos combustibles para poder funcionar. Es la tecnología que se aplica en mayor medida en vehículos pesados.

La tecnología GNC se utiliza principalmente en turismos, furgonetas y camiones hasta 26 toneladas; mientras que la GNL se usa en camiones de transporte de gran tonelaje (>26 toneladas).

| | |
|-----------|--|
| AUTONOMÍA | GNC: Turismo~400km; Camión y autobús suburbano de cercanías~500km; Permite alcanzar autonomía suficiente para el transporte (ligero y pesado) en áreas metropolitanas. GNL: Camión~1.500 km ;Permite alcanzar autonomía suficiente para el transporte pesado internacional. |
| EMISIONES | Especialmente indicado para reducir las emisiones locales (partículas, SO _x y NO _x) Las emisiones de CO ₂ del gas natural son inferiores a la gasolina aunque similares al gasóleo. |
| PRECIO | Precio combustible: El precio final de venta al público del gas natural es inferior al de los combustibles convencionales. Precio del vehículo: El precio de compra de los turismos propulsados gas natural se puede considerar alrededor de un 5% superior a los de gasolina y puede equipararse al precio de un diésel. La entrada del estándar Euro VI conlleva costes de adquisición y mantenimiento más elevados para los vehículos de gasóleo debido a los filtros y catalizadores requeridos para el cumplimiento de los valores límite de emisiones, lo que supone una reducción del diferencial de la inversión inicial en un vehículo de GNC/GNL y un vehículo diésel Euro VI. |
| REPOSTAJE | No existe ninguna limitación técnica para suministrar GNC en cualquier lugar del territorio nacional gracias a la red de gasoductos. Las plantas satélites de GNL permiten que el GNL pueda estar disponible en todo el territorio nacional con la consiguiente creación de los puntos de suministro en los lugares en donde haya demanda. |
| OPERACIÓN | Para el GNC y GNL el procedimiento de operación de los puntos de repostaje es similar al de los combustibles convencionales. En este último caso, requiere de medidas de seguridad especiales al repostar dada su baja temperatura. El GNL no puede almacenarse en los depósitos de los vehículos durante semanas ya que se fuga progresivamente (boll off), siendo por ello más indicado en camiones pesados de transporte de larga distancia |

Tabla 1. Características vehículos propulsados por gas natural
(Fuente: Marco de Acción Nacional [31])

Se prevé que para 2020 existan en España aproximadamente 18.000 vehículos de gas natural (800 GNL + 17200 GNC).

- **Electricidad:** existen 3 tecnologías de vehículos eléctricos en el mercado español:
 - Vehículo eléctrico puro (BEV)
 - Vehículo eléctrico de autonomía extendida (EREV)
 - Vehículo híbrido enchufable (PHEV)

| PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS | |
|---|--|
| PRESTACIONES | Mayor eficiencia del motor frente a los térmicos |
| AUTONOMÍA | <p>La autonomía actual de la mayoría de los turismos eléctricos puros (BEV) comercializados es de 150 -200km. Esta autonomía permite cubrir la mayor parte de los trayectos urbanos (de media 30 km y menos de 1 hora de duración)</p> <p>Aunque existen modelos eléctricos con autonomía superior, su comercialización en España es anecdotica. Recientemente se ha iniciado la comercialización de baterías de segunda generación con autonomía de 300km.</p> |
| EMISIONES | <p>Permite la reducción de las emisiones, siendo posible reducir a cero las emisiones dentro de los núcleos urbanos, lo que lo hace especialmente indicado para la movilidad en las grandes ciudades.</p> <p>Las emisiones reales dependen del mix energético correspondiente a la generación de energía eléctrica que en España son relativamente bajas al situarse en los 0,30kg CO₂/kWh- 50g CO₂ por km.</p> <p>Si las recargas están garantizadas con generación de origen renovable, las emisiones totales de los vehículos eléctricos puros (BEV) son nulas.</p> <p>Es necesario garantizar un adecuado reciclado de baterías.</p> |
| PRECIO | <p>Precio de la electricidad destinada a la recarga de vehículos eléctricos: en 2011 entró en vigor la tarifa eléctrica denominada "supervalle" con el objetivo de fomentar la recarga lenta de los vehículos eléctricos en las horas de menor demanda del sistema, desde la 1:00 h. de la madrugada hasta las 7:00 h. de la mañana, con menores precios que incentiven el traslado del consumo del periodo punta a estas horas para aplanar la curva de la demanda.</p> <p>El coste de las recargas lentas de energía eléctrica en vivienda durante la noche es inferior (26/100km) que el precio de los combustibles convencionales.</p> <p>Existe un índice de referencia de precio de la electricidad en el mercado Ibérico.</p> <p>Precio de adquisición de los vehículos eléctricos puros (BEV): resulta entre un 30-40% más elevado que el de sus homólogos de gasolina o diésel, debido principalmente al coste de las baterías y la pequeña escala de sus procesos de fabricación. Sin embargo, su mantenimiento y el coste de la electricidad utilizada en su propulsión es sustancialmente menor.</p> |

| PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS | |
|---|--|
| REPOSTAJE | <p>La instalación de puntos de recarga en el propio domicilio, en el lugar de trabajo o en el sector terciario (hoteles, restaurantes, centros comerciales, etc.) garantiza la accesibilidad a todo el público. No obstante, el tipo de construcción arquitectónica de las viviendas en España (Comunidades de vecinos en el centro de la ciudad) encarece la instalación de puntos de recarga en viviendas.</p> |
| OPERACIÓN | <p>La tensión y potencia de los puntos de recarga lenta/vinculada es la misma que la de consumo doméstico, lo que hace que no sea necesario definir procedimientos específicos de operación del punto de recarga. No obstante, los puntos de recarga rápida requieren potencias de 50kW.</p> <p>No se debe olvidar que en un escenario a 2030 de gran penetración de vehículo eléctrico, se podrá llegar a demandar una potencia instantánea (debido a la conexión masiva de vehículos para su recarga) de hasta un 10% de la potencia demandada a nivel nacional en horario nocturno. Por ello, la gestión inteligente de la carga por parte del Operador del Sistema (REE) se postula como un factor clave para que el despliegue sea sostenible en el conjunto del sistema eléctrico.</p> |

Tabla 2. Características de los vehículos eléctricos

(Fuente: Marco de Acción Nacional [31])

La infraestructura eléctrica quizá es la más desarrollada en el país, pero la flota de vehículos incluye principalmente turismos, motocicletas, autocares...; los vehículos de gran tonelaje no suelen ser propulsados mediante este sistema dada la poca autonomía que ofrece.

- **GLP:** este tipo de tecnología presenta una serie de dificultades técnicas que hace que todavía no se use en vehículos pesados de forma efectiva.

| | |
|-----------|--|
| PRECIO | <p>Precio de los vehículos a GLP de fábrica: similar a los vehículos convencionales diesel y entre 700 a 1000 euros superior a gasolina. Las transformaciones varían entre los 1000 y 2.500 euros según la cilindrada del motor.</p> <p>Precio del combustible: El precio del GLP en los mercados internacionales está vinculado al precio del petróleo. Aunque, a diferencia del petróleo, el precio del GLP se ve influenciado por el precio de las naftas para uso petroquímico y de las situaciones locales de sobreoferta o escasez. Actualmente en España su precio es inferior al de los combustibles convencionales.</p> |
| REPOSTAJE | <p>La infraestructura de repostaje está ya implantada a lo largo de todo el territorio (468 EESS en todas las CCAA). La infraestructura existente en 2017 permitirá atender un parque de 200.000 vehículos (parque actual en España de 50.000 vehículos aproximadamente)</p> <p>Tiempo de repostaje similar a los combustibles convencionales.</p> |
| OPERACIÓN | No supone cambio de hábitos para los usuarios |

Tabla 3. Características de los vehículos propulsados por GLP

(Fuente: Marco de Acción Nacional [31])

- **Hidrógeno:** el hidrógeno tiene dos aplicaciones principales en el sector de la automoción:

- Pilas de combustible
- Motores de combustión interna

| CARACTERÍSTICAS DE LOS VEHICULOS DE PILA DE COMBUSTIBLE (FCEV) | |
|--|--|
| PRESTACIONES | A diferencia de los vehículos eléctricos de baterías, las prestaciones de los FCEV no dependen de la tecnología de la batería que alimente el motor. La pila de combustible es un dispositivo electroquímico cuya eficiencia no está sujeta al ciclo de Carnot. Por ello, es posible aumentar la eficiencia desde un 20% (turismo convencional) a un 60% (FCEV). |
| AUTONOMÍA | Similar a los turismos de gasolina/gasóleo- 550-600 km. Por su parte, los autobuses urbanos alcanzan autonomías de 350km. |
| EMISIONES | Nulas de tanque a rueda. Si hablamos del ciclo total de generación a rueda, dependen de la fuente del hidrógeno, si bien, incluso usando reformado de gas natural en lugar de electrolisis, puede presentar menores emisiones totales que los combustibles convencionales |
| PRECIO | El precio del combustible no está indexado al del petróleo. Los principales inconvenientes radican en que el precio de venta del hidrógeno varía mucho en función del proceso productivo (reformado gas natural, electrolisis, etc.) y la logística. El precio en las actuales hidrogeneras en España es competitivo con respecto a tecnologías convencionales. Los vehículos turismos conocidos presentan un elevado precio de venta (50.000-60.000€) |
| REPOSTAJE | Tiempo de repostaje de un turismo similar a los vehículos convencionales (3 minutos para depósito de 5kg de capacidad) España cuenta con seis hidrogeneras. |
| OPERACIÓN | El hidrógeno puede almacenarse en depósitos durante semanas sin degradarse, fugar o perder sus cualidades Los vehículos almacenan el hidrógeno a presiones entre 350 y 700 bares, mientras que en las hidrogeneras pueden almacenarse a presiones algo superiores. |

Tabla 4. Características de los vehículos propulsados por hidrógeno

(Fuente: Marco de Acción Nacional [31])

El parque español de vehículos propulsados por hidrógeno carece de vehículos pesados.

- **Biocarburantes:** la principal ventaja de este tipo de tracción es que, en general, todos los vehículos con un motor diésel están garantizados a funcionar con una mezcla de hasta un 7% de biodiésel.

| CARACTERÍSTICAS DE LOS VEHÍCULOS DE BIOCABURANTES | |
|---|---|
| PRESTACIONES | Las prestaciones son las mismas que las del combustible fósil con el que se mezcla o del que es sustitutivo. Los usos para los que resulta adecuado serán los mismos que los del combustible con el que se mezcla o del que es sustitutivo. |
| AUTONOMÍA | La autonomía de los vehículos propulsados con biocarburantes es la misma que la proporcionada por los combustibles convencionales con el que se mezcla o del que es sustitutivo. |
| EMISIONES | Reduce las emisiones de partículas y monóxido de carbono (CO). La utilización de biocarburantes fabricados a partir de residuos potencialmente contaminantes (aceites de cocina usados, grasas industriales residuales o residuos sólidos urbanos) permite su aprovechamiento energético y evita su vertido al medio ambiente. No obstante, es necesario controlar el nivel de emisiones de GEI asociado al proceso de fabricación del biocarburante para conseguir reducir las emisiones netas. Al no reducirse de forma natural la emisión de NO _x requiere sistemas adicionales de reducción catalítica. El biogás procedente de residuos urbanos tiene alto contenido en azufre y baja concentración de metano por lo que se requieren procesos adicionales de desulfuración y concentración. |
| PRECIO | Según datos de la CNMC, en 2015 el promedio del diferencial cotización biodiésel sostenible- cotización gasóleo fue de 318\$/tonelada y el promedio del diferencial cotización bioetanol-cotización de la gasolina fue de 202,9 \$/tonelada. Para el usuario final el precio de venta al público de mezclas con bajo contenido en biocarburantes es similar al precio de los combustibles convencionales. |
| REPOSTAJE | No requiere la creación de infraestructura de repostaje específica, pues la forma más adecuada de suministrarlo es la mezcla con gasolina o gasóleo. No supone un cambio de hábitos de repostaje para los usuarios Actualmente sólo el 0,9% de estaciones de servicio ofrecen mezclas con alto contenido de biocarburantes (87% de biodiésel y únicamente 13% de bioetanol) |
| OPERACIÓN | Los procedimientos de operación son los mismos que se utilizan para el combustible del que es sustitutivo o con el que se suministra en mezcla. |

Tabla 5. Características de los vehículos propulsados por biocombustible

(Fuente: Marco de Acción Nacional [31])

A nivel nacional, desde la Comunidad de Madrid se han redactado documentos referentes a este tema como son la “Guía de referencia para la incorporación de VEAs en actividades profesionales” [30] o el estudio de viabilidad “Caracterización de las flotas de VEAs” [32]. En ambos documentos se recopila información sobre la situación de las energías alternativas en el sector del transporte, el estado de la flota de vehículos de energía alternativa (VEAs), así como su oferta comercial y algunas consideraciones sobre el uso de estas tecnologías energéticas. Las tecnologías que conjuntamente contemplan estos documentos son:

- **Electricidad:** aunque las tecnologías de tracción eléctricas se utilizan principalmente en turismos, motocicletas y vehículos de pequeño tonelaje; existen algunos modelos de vehículos destinados al transporte de mercancías por carretera de esta tipología.

Renault Gama D 16 ZE (abr 2019)

| | |
|----------------------------------|--------------|
| Carga (kg) | Hasta 16.700 |
| Volumen (l) | N.D. |
| Potencia (CV) | 252 |
| Consumo (Wh/km) | 1000 aprox |
| Autonomía (km) | 300 |
| Emisiones CO ₂ (g/km) | 0 |



Renault Gama D 26 WIDE ZE (abr 2019)

| | |
|----------------------------------|--------------|
| Carga (kg) | Hasta 27.000 |
| Volumen (l) | N.D. |
| Potencia (CV) | 503 |
| Consumo (Wh/km) | 1000 aprox |
| Autonomía (km) | 200 |
| Emisiones CO ₂ (g/km) | 0 |



Figuras 2 y 3. Modelos de vehículos eléctricos

(Fuente: Guía de referencia para la incorporación de VEAs en actividades profesionales [30])

- **Gas natural:**

Iveco – Stralis AS440S40T/P 2xGNL

| | |
|---------------------|------------|
| Potencia motor (cv) | 400 |
| Capacidad GNL (kg) | 410 |
| Cilindrada (cc) | 8700 |
| Par máximo (Nm) | 1700 |
| Cambio de marchas | Automático |
| MTMA (kg) | 20000 |
| Tara (kg) | 7455 |



Iveco – Stralis AS440S46T/P 2xGNL

| | |
|---------------------|------------|
| Potencia motor (cv) | 400 |
| Capacidad GNL (kg) | 410 |
| Cilindrada (cc) | 12900 |
| Par máximo (Nm) | 2000 |
| Cambio de marchas | Automático |
| MTMA (kg) | 20000 |
| Tara (kg) | 7724 |



Scania – Larga distancia tractora 4x2 410CV GNL/GNC

| | |
|------------------------|------------------------|
| Potencia motor (cv) | 410 |
| Capacidad GNL/GNC (kg) | Varias configuraciones |
| Cilindrada (cc) | 12700 |
| Par máximo (Nm) | 2000 |
| Caja de cambios | Opticruise/ Automática |



Scania – Larga distancia RÍGIDO 6x2*4 410CV GNL/GNC

| | |
|------------------------|------------------------|
| Potencia motor (cv) | 410 |
| Capacidad GNL/GNC (kg) | Varias configuraciones |
| Cilindrada (cc) | 12700 |
| Par máximo (Nm) | 2000 |
| Caja de cambios | Opticruise/ Automática |



Volvo – FH/FM LNG (40(MMC)/26/18 T)

| | |
|---------------------|------------------------|
| Potencia motor (cv) | 420/460 |
| Capacidad GNL (kg) | 115/155/205 |
| Cilindrada (cc) | 13000 |
| Par máximo (Nm) | 2100/2300 |
| Caja de cambios | Automatizado (I-Shift) |



Uro – Uro K6G – Estrecho v

| | |
|---------------------|------------|
| Potencia motor (cv) | 250 |
| Capacidad GNL (kg) | 76 |
| Cilindrada (cc) | 8900 |
| Par máximo (Nm) | 990 |
| Caja de cambios | Automático |
| MTMA (kg) | 18000 |
| Anchura total (m) | 2 |



| Iveco Eurocargo Natural Power | |
|----------------------------------|--------------|
| Carga (Kg) | Hasta 16.000 |
| Volumen (l) | N.D. |
| Potencia (CV) | 204 |
| Consumo (Wh/km) | N.D. |
| Autonomía (Km) | 520 |
| Emisiones CO ₂ (G/km) | N.D. |



| Iveco Stralis Tractora Natural Power | |
|--------------------------------------|---------------------|
| Carga (Kg) | Hasta 40.000 |
| Volumen (l) | N.D. |
| Potencia (CV) | 460 |
| Consumo (Wh/km) | N.D. |
| Autonomía (Km) | 570 / 1.100 / 1.600 |
| Emisiones CO ₂ (G/km) | N.D. |
| Combustible (GNC-GNL) | GNC / GNC-GNL / GNL |



| Iveco Stralis Tractora Natural Power | |
|--------------------------------------|---------------------|
| Carga (Kg) | Hasta 40.000 |
| Volumen (l) | N.D. |
| Potencia (CV) | 400 |
| Consumo (Wh/km) | N.D. |
| Autonomía (Km) | 570 / 1.035 / 1.500 |
| Emisiones CO ₂ (G/km) | N.D. |
| Combustible (GNC-GNL) | GNC / GNC-GNL / GNL |



| Iveco Stralis Natural Power | |
|----------------------------------|---------------------|
| Carga (Kg) | Hasta 32.000 |
| Volumen (l) | N.D. |
| Potencia (CV) | 330 |
| Consumo (Wh/km) | N.D. |
| Autonomía (Km) | 400 / 800 |
| Emisiones CO ₂ (G/km) | N.D. |
| Combustible (GNC-GNL) | GNC / GNC-GNL / GNL |



Figuras 4 a 14. Modelos de vehículos impulsados por gas natural

(Fuente: Guía de referencia para la incorporación de VEAAs en actividades profesionales [30])

- Gas licuado del petróleo:** la tracción con GLP todavía no está presente en vehículos de gran tonelaje puesto que existen unos requerimientos tecnológicos en la adaptación de sus motores que aún no se han desarrollado correctamente.

Además, la “Guía de referencia para la incorporación de VEAAs en actividades profesionales” [30] estudia los escenarios de media y larga distancia (intra/interregional) y recomienda para cada uno de ellos distinta tipología de vehículos.

- Intrarregional:** recorridos entre diferentes comunidades autónomas (CCAA) o dentro de una misma CCAA con 150-500 km de media. Para este modelo de transporte se recomiendan vehículos del grupo 4 (furgones y camionetas 2800-3500 kg), del grupo 5 y 6 (camiones ligeros 3500-6000 kg y medianos 6000-12000 kg) y del grupo 7 (camiones grandes 12000-40000 kg). Las tecnologías recomendadas para este tipo de transporte:

| Submodelo Analizado | VEHÍCULOS MÁS UTILIZADOS | ADECUACIÓN VEHÍCULOS DE ENERGÍAS ALTERNATIVAS | | |
|-----------------------|--------------------------|---|-------------|-----|
| | | ELECTRICOS | GAS NATURAL | GLP |
| Modelo intrarregional | G4 2.800-3.500 Kg | X | X | |
| | G5 3.500-6.000 Kg | X | X | |
| | G6 6.000-12.000 Kg | X | X | |
| | G7 12.000-40.000Kg | X | X | |

Tabla 38: Modelo intraregional **Fuente:** Elaboración propia CITET

Tabla 6. Vehículos recomendados para transporte intrarregional

(Fuente: Guía de referencia para la incorporación de VEAAs en actividades profesionales [30])

- **Interregional:** este modelo tiene en cuenta distancias recorridas mayores a 500 km. Los vehículos principalmente en este tipo de transporte pertenecen a los grupos 6, 7 (ya explicados) y al grupo 8 (hasta 44000 kg). Las tecnologías recomendadas para este tipo de transporte son:

| Submodelo Analizado | VEHÍCULOS MÁS UTILIZADOS | ADECUACIÓN VEHÍCULOS DE ENERGÍAS ALTERNATIVAS | | | |
|---------------------------|-----------------------------|--|-------------|-----|-----|
| | | ELÉCTRICOS | GAS NATURAL | | |
| | | | GNC | GNL | GLP |
| Modelo interre- gional | G6 6.000-12.000 Kg | | X | X | |
| | G7 12.000- 40.000Kg | | X | X | |
| | G8 hasta 40.000 Kg | | | | |

Tabla 39: Modelo interregional **Fuente:** Elaboración propia CITET

Tabla 7. Modelos de vehículos recomendados para transporte interregional
(Fuente: Guía de referencia para la incorporación de VEA en actividades profesionales[30])

Anexo 2. Método AHP

Los problemas que se presentan en la sociedad actual son cada vez más complejos de resolver y son necesarias cantidad de justificaciones y criterios para llegar a una solución. La toma de decisiones multicriterio es uno de estos problemas.

Ante esta situación es necesario un método que permita afrontar este tipo de decisiones complejas. El Proceso Analítico Jerárquico (de ahora en adelante AHP) es una de las soluciones a este problema social puesto que deja de lado la subjetividad e influencia personal que puede suponer resolver problemas de decisión por el método tradicional. Aunque existen otros métodos de decisión multicriterio, alguna de las razones por las que se ha escogido el AHP son:

- Presenta un sustento matemático.
- Permite medir criterios cuantitativos y cualitativos con una misma escala.
- Permite incluir la opinión de distintas personas o grupos y generar un consenso.
- Permite realizar correcciones si es necesario, así como complementar la solución con métodos de optimización.

El Proceso Analítico Jerárquico (AHP), desarrollado por Thomas L. Saaty [33] en la década de los 80, tiene como base la idea de que un problema complejo multicriterio se puede resolver jerarquizando los distintos subproblemas. Según Saaty, este método “desmenuza un problema y luego une todas las soluciones de los subproblemas en una conclusión”. Para esto son necesarias distintas evaluaciones de cada uno de los criterios y, además, la preferencia respecto a cada una de las alternativas de decisión. El resultado final de este método es una jerarquía que muestra la preferencia global de cada una de las alternativas propuestas como decisión.

El proceso propuesto por Saaty para el AHP consta de 4 etapas diferenciadas que se explican detalladamente en los siguientes apartados.

1. Modelización

Esta primera etapa es de gran importancia puesto que es en ella donde se estructura el problema y a partir de la misma se desarrollarán el resto. En ella se realiza la jerarquización del problema, desde el objetivo hasta las alternativas objetos de estudio.

Para ello la primera tarea dentro de esta etapa es la identificación clara del objetivo. Una vez identificado, se listan las diferentes alternativas cuyo orden prioritario se quiere conocer. Definidos los extremos del problema, se comienzan a determinar los criterios a valorar. Estos criterios deben cumplir una serie de requisitos:

- Deben representar el problema de la forma más completa posible.
- Deben poderse medir, cuantitativa o cualitativamente.

Una vez definido el objetivo, los criterios y las alternativas se tiene una estructura de 3 niveles como la que sigue:

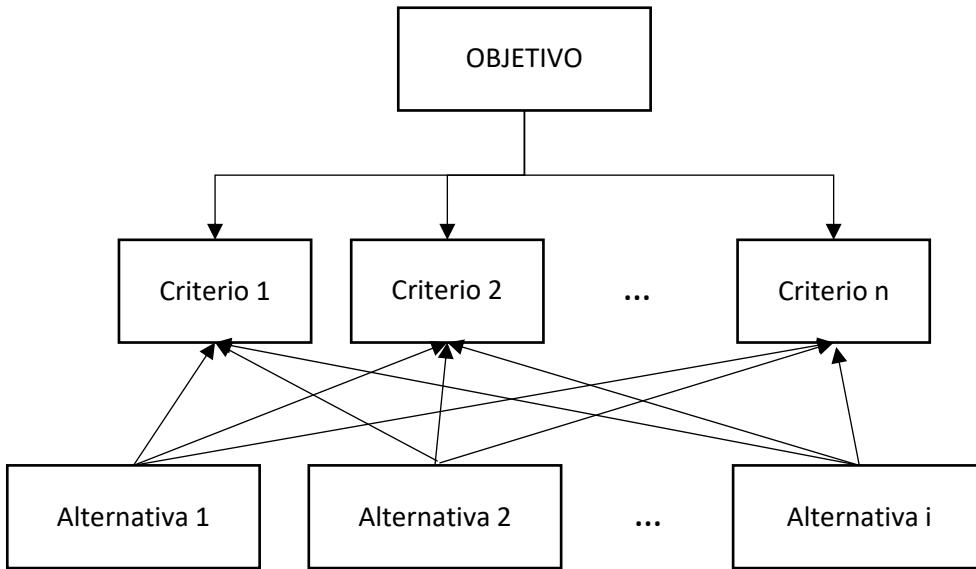


Figura 1. Esquema jerárquico
(Fuente: Elaboración propia)

En el caso de que fuese necesario podría definirse entre los niveles 2 (criterios) y 3 (alternativas) un nuevo nivel de subcriterios. Cada uno de los criterios podría tener un número cualquiera de subcriterios.

2. Valoración

Una vez estructurado el problema y representado el esquema jerárquico del mismo, se procede a ordenar y ponderar los diferentes criterios para cada una de las alternativas.

El objetivo principal de esta etapa es medir la importancia de cada uno de los criterios. Para ello se utiliza una comparación pareada, es decir, se compara cada criterio o alternativa i con cada criterio o alternativa j . Se utiliza para esta comparación una escala con valores de 1 a 9 que califican las preferencias relativas en cada par. En la siguiente tabla se muestra el significado de cada uno de los valores:

| VALOR | SIGNIFICADO |
|------------|---|
| 1 | Misma importancia |
| 3 | Importancia ligera |
| 5 | Importancia moderada |
| 7 | Importancia marcada |
| 9 | Importancia extrema |
| 2, 4, 6, 8 | Valores intermedios para posibles matices |

Tabla 2. Valores en la escala de comparación
(Fuente: Saaty, 1980 [28])

Establecidos los valores de comparación, el siguiente paso es construir la matriz de comparaciones pareadas. Esta matriz será una matriz cuadrada $A_{nxn} = [a_{ij}]$ con $i \geq 1, j \leq n$. Para su construcción han de tenerse en cuenta los siguientes axiomas:

- Axioma de reciprocidad. Si A es una matriz de comparaciones pareadas, entonces se cumple que si $a_{ij} = x$ entonces $a_{ji} = 1/x$ con $1/9 \leq x \leq 9$.

- Axioma de homogeneidad. Los elementos que se comparan entre sí deben ser del mismo orden de magnitud y jerarquía.
- Axioma de independencia. Cuando el decisor realiza las comparaciones, se supone que los criterios no tienen dependencia con las propiedades de las alternativas.
- Axioma de las expectativas. Para el propósito de la toma de una decisión, se asume que la jerarquía es completa.

Cumpliendo con los axiomas citados y siguiendo el procedimiento la matriz de comparaciones pareadas A quedaría:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

3. Priorización y síntesis

Esta etapa es meramente cuantitativa y en su desarrollo se conocerá la importancia entre criterios de un mismo nivel y la jerarquización de las alternativas. A partir de la matriz A , es posible afirmar que si existe un valor λ que cumpla la ecuación X, entonces el vector ν es un vector propio de A correspondiente al valor propio λ .

$$A\nu = \lambda\nu \quad (\text{Ec. 1})$$

Los valores propios λ de la matriz se calculan siguiendo la siguiente ecuación:

$$|A - \lambda I| = 0 \text{ con } I \text{ la matriz identidad del orden de } A \quad (\text{Ec. 2})$$

El valor propio principal de la matriz A es el máximo de los valores propios obtenidos. En un caso ideal con una matriz $A[nxn]$ el valor propio $\lambda = n$ es el principal de A y ν_n es el vector propio asociado al mismo.

Cuando el vector propio que se obtenga sea el de la matriz de criterios se denominará ν_c e indicará el peso o importancia relativa que cada uno de los criterios tiene en la valoración del conjunto de alternativas.

Cuando el vector propio sea el de la matriz de alternativas para un criterio determinado le denominaremos ν_{ai} e indicará el peso o importancia relativa de cada alternativa para el criterio i.

4. Análisis de consistencia

La decisión final se verá afectada por la consistencia de los juicios del decisor a la hora de realizar las comparaciones pareadas y construir las matrices. Esto es debido a lo personal de la decisión, que puede dar lugar a una inconsistencia que deberá evaluarse y comprobar que está dentro de unos límites que se definirán a continuación.

La propiedad de consistencia solo se da en casos ideales, es decir, cuando:

$$A[nxn] \text{ con } \lambda_{max} = n \rightarrow A \text{ es consistente}$$

El grado de consistencia se mide con la ratio de consistencia (CR). Si este está dentro de los límites puede continuarse con el proceso de decisión. En el caso de que sea inaceptable deberá reconsiderarse el proceso y modificar los juicios sobre las comparaciones pareadas.

La ratio de consistencia se calcula siguiendo el siguiente procedimiento:

- 1) Se normaliza la matriz A

$$A_{normalizada} = \left[\frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}} \right] \quad (Ec. 3)$$

- 2) Se suman sus filas

$$\begin{aligned} \frac{a_{11}}{\sum_{n=1}^n a_{n1}} + \frac{a_{12}}{\sum_{n=1}^n a_{n2}} + \cdots + \frac{a_{1n}}{\sum_{n=1}^n a_{nn}} &= b_1 \\ \frac{a_{21}}{\sum_{n=1}^n a_{n1}} + \frac{a_{22}}{\sum_{n=1}^n a_{n2}} + \cdots + \frac{a_{2n}}{\sum_{n=1}^n a_{nn}} &= b_2 \\ &\vdots \\ \frac{a_{n1}}{\sum_{n=1}^n a_{n1}} + \frac{a_{n2}}{\sum_{n=1}^n a_{n2}} + \cdots + \frac{a_{nn}}{\sum_{n=1}^n a_{nn}} &= b_n \end{aligned} \quad (Ec. 4)$$

- 3) Se forma un vector de prioridades B

$$B = \left[\frac{b_1}{n}, \frac{b_2}{n}, \dots, \frac{b_n}{n} \right]^T \quad (Ec. 5)$$

- 4) El producto de la matriz original A por el vector B da lugar a una matriz columna C

$$A \cdot B = C = [c_1, c_2, \dots, c_n]^T \quad (Ec. 6)$$

- 5) Se realiza el cociente entre la matriz C y el vector B , obteniendo otro vector columna D

$$C/B = D \quad (Ec. 7)$$

- 6) Se suman y promedian los elementos del vector D

$$\lambda_{max} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad (Ec. 7)$$

- 7) Se obtiene el índice de consistencia como:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (Ec. 8)$$

Obtenido el CI de la matriz, se compara con los recogidos en la siguiente tabla:

| Tamaño de la matriz (n) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Consistencia aleatoria | 0.00 | 0.00 | 0.52 | 0.89 | 1.11 | 1.25 | 1.35 | 1.40 | 1.45 | 1.49 |

Tabla 3. Índices de consistencia aleatorios para distintos tamaños de matriz
(Fuente: Saaty, 1980 [28])

Los valores de la tabla anterior representan el valor que debería obtener el CI si los juicios numéricos con la escala presentada en la tabla X hubieran sido introducidos de manera aleatoria en la matriz de comparaciones pareadas.

- 8) Dividiendo entonces el CI real obtenido por la consistencia aleatoria correspondiente al tamaño de la matriz estudiada:

$$CR = \frac{CI}{Consistencia\ aleatoria} \quad (Ec. 9)$$

Una vez obtenido la ratio de consistencia, ha de comprobarse que sea aceptable. Para ello se comprueba que esté dentro de los siguientes límites:

| Tamaño de la matriz (n) | Ratio de consistencia (RC) |
|-------------------------|----------------------------|
| 3 | 5% |
| 4 | 9% |
| 5 o superior | 10% |

Tabla 4. Límites de consistencia

(Fuente: Saaty, 1980 [28])

Si la ratio de consistencia es superada en algún caso, deberán revisarse las valoraciones que el decisor ha realizado y modificarlas para reducirlo hasta que pueda considerarse aceptable.

En el siguiente esquema aparece de forma resumida el proceso a seguir para la aplicación del método AHP:

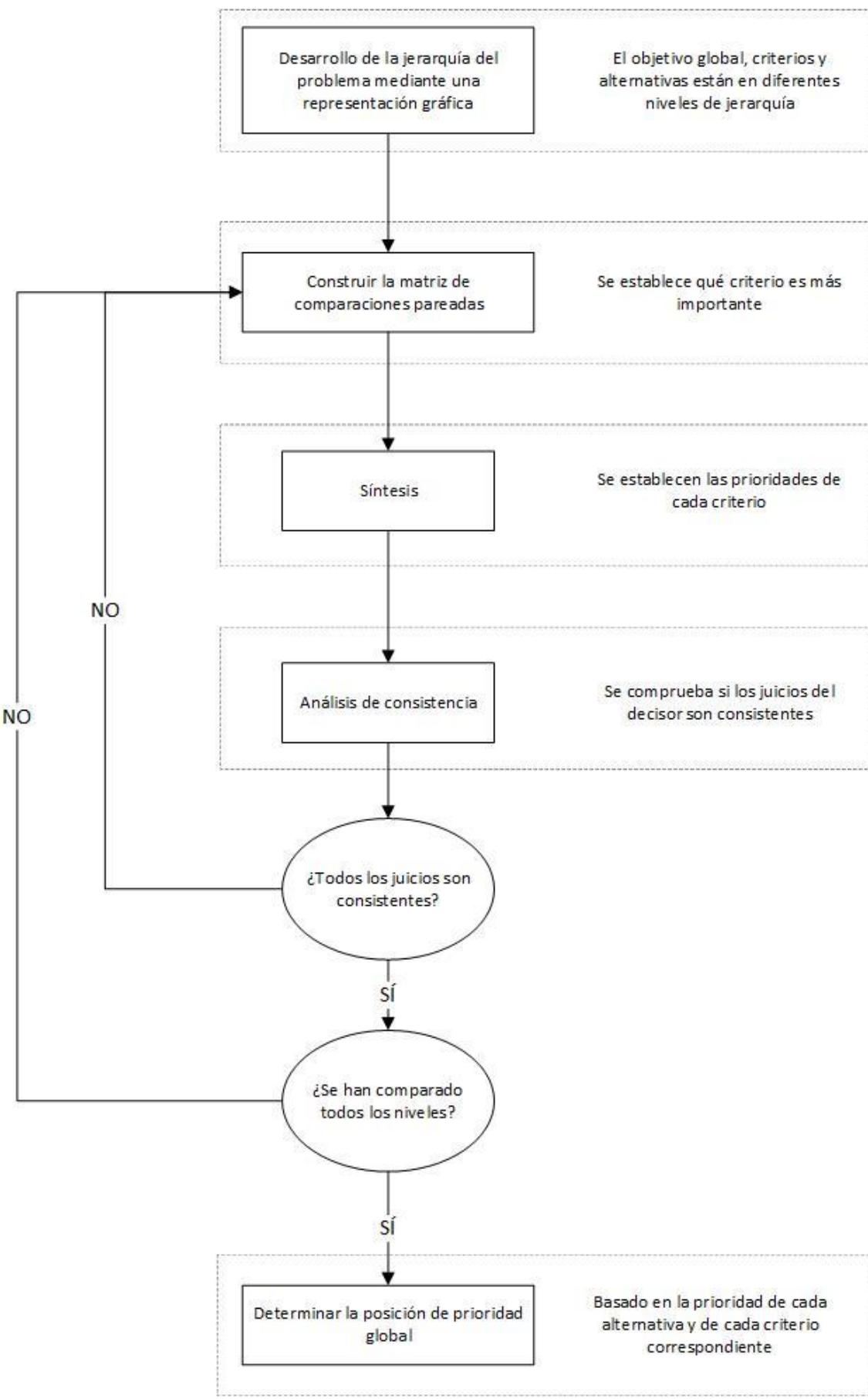


Figura 2. Esquema resumen del AHP

Anexo 3. Cuestionario de evaluación del modelo propuesto

A. Introducción e instrucciones

En base a su experiencia y conocimiento, nos gustaría realizar un **análisis de importancia** que determinados factores tienen para la **optimización de operaciones de transporte de mercancías**.

A continuación, adjuntamos la escala de calificación y algunos ejemplos sobre cómo usarla en esta encuesta.

| Comparando dos criterios A y B... | | |
|-----------------------------------|------------------------|---|
| 1 | Misma importancia | A tiene la misma importancia que B |
| 3 | Importancia moderada | A es moderadamente más importante que B |
| 5 | Importancia fuerte | A tiene una importancia fuerte sobre B |
| 7 | Importancia muy fuerte | A tiene una importancia muy fuerte sobre B |
| 9 | Importancia extrema | A es extremadamente más importante que B |

EJEMPLO 1:

- **Paso 1:** Considerando que comparamos el criterio A con respecto al criterio B y creemos que para nosotros es más importante el A, marcamos con una X en la casilla correspondiente.
- **Paso 2:** Es necesario valorar ahora en qué grado es más importante A que B. Utilizamos para ello la escala propuesta en la tabla anterior. Por ejemplo, si consideramos que A tiene una importancia muy fuerte respecto a B entonces pondremos un 7.

NOTA: Si consideramos que los dos criterios que comparamos tienen la misma importancia, entonces marcaremos la casilla de los dos criterios y en el grado de importancia pondremos un 1.

| Criterio a comparar (i) | $C_i > C_j$ | Criterio a comparar (j) | $C_j > C_i$ | ¿En qué medida cree que es más importante? (Utilice la escala propuesta) |
|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------|--|
| A | X | B | | 7 |

Además, como parte final del análisis, nos gustaría saber qué **importancia tienen los criterios** (bajo su opinión) **comparándolos con las alternativas** propuestas. La mecánica para responder a este apartado es la misma que la explicada anteriormente.

En el reverso de esta hoja se adjunta la explicación detallada de cada uno de los criterios que intervienen en este cuestionario.

- A. Económico:** este criterio engloba todas aquellas características que puedan influir en los resultados económicos de la empresa a la hora de implantar una nueva tecnología que optimice sus operaciones de transporte.
- B. Social:** este criterio integra aquellas características que pueden dar o quitar valor a la tecnología, dada su influencia en la plantilla de la empresa.
- C. Medioambiental:** este criterio aúna las características que pueden influir, bien positiva o bien negativamente, en el medioambiente debido a la implantación de determinadas tecnologías.
- D. Tecnológico:** este criterio lo constituyen las características tecnológicas que poseen las tecnologías utilizadas en la optimización de operaciones, que pueden ser la base de las decisiones tomadas en la empresa la implantación o no de estas últimas.

A1. Inversión: este criterio reúne todos aquellos costes e inversiones que deben ser realizados antes de la puesta en marcha del conjunto de tecnologías.

A2. Coste de mantenimiento: este criterio engloba todos aquellos desembolsos necesarios para mantener la tecnología a un nivel operativo correcto (mantenimiento, adecuación, actualización...).

A3. Ahorro: este criterio se refiere al beneficio económico obtenido debido a la aplicación de tecnologías. Es decir, dependiendo de las características de la inversión y los costes de mantenimiento; el dinero que la empresa ahorraría (y por tanto podría entenderse como un beneficio) frente a la situación de no implantar ninguna tecnología u otra de características distintas totalmente.

B1. Aceptación social: este criterio se refiere al grado de aceptación mostrado por parte de los usuarios que se ven afectados por la introducción de nuevas tecnologías en sus puestos de trabajo.

B2. Mejora condiciones de trabajo: este criterio se refiere a si las condiciones de trabajo del personal afectado por la implantación de nuevas tecnologías en sus funciones se ven o no mejoradas.

B3. Capacitación del personal: este criterio mide la necesidad de capacitar al personal para utilizar las tecnologías a implantar. Dependiendo de la dificultad de la tecnología en cuestión esta capacitación será necesaria o no.

C1. Emisiones: este criterio hace referencia a la huella de carbono que tenía la empresa frente a la que tendría tras la implantación del conjunto de tecnologías.

C2. Congestión: este criterio alude a la congestión de tráfico que se presenta (bien en carreteras o en ciudades, polígonos...) tras la aplicación del conjunto de tecnologías seleccionado.

D1. Madurez de la tecnología: este criterio describe cómo de preparada está la tecnología en cuestión para ser implantada.

D2. Cambio tecnológico: este criterio hace referencia al cambio que se da en la empresa a nivel tecnológico, tomando como situación inicial antes de implantar la tecnología y como situación final tras ser implantada.

D3. Optimización operativa: este último criterio se refiere al grado de optimización que se consigue al implantar la tecnología o el conjunto de estas. Es decir, si tras implantar estas los recursos de los que disponía previamente la empresa pueden utilizarse de una forma más efectiva.

ALT1. Sistema de propulsión del vehículo: hace referencia a la tecnología de tracción utilizada en el funcionamiento del vehículo (diésel, electricidad, GLP, biodiesel...)

ALT2. Optimización de ruta: engloba todos aquellos procesos necesarios para optimizar la ruta a realizar por un vehículo durante una operación de transporte (recopilación de información, manejo de esta y transmisión de esta al usuario).

ALT3. Optimización de carga: contiene todos los procesos utilizados para conseguir una carga de los camiones óptima; desde la identificación de todos los bultos, su correcta ubicación en la caja del camión y posterior seguimiento de cada uno de ellos.

ALT4. Trazabilidad de la operación: hace referencia al conjunto de tecnologías que se utilizan para seguir el proceso de evolución de la operación de transporte, especialmente en la etapa de transporte como tal (dónde se encuentra el camión, estado de la carga, consumos del vehículo, seguridad de la operación...).

B. Comparación de criterios

- En base a su conocimiento/experiencia **¿qué criterio es más importante** cuando comparamos los siguientes criterios para la optimización de operaciones de transporte de mercancías? (Marque con una X el criterio que **CONSIDERE MÁS IMPORTANTE**, o ambas casillas en caso de **IGUAL IMPORTANCIA**)
- ¿En qué medida?** Utilice la escala propuesta.

| Criterio a comparar (<i>i</i>) | $C_i > C_j$ | Criterio a comparar (<i>j</i>) | $C_j > C_i$ | ¿En qué medida cree que es más importante? (Utilice la escala propuesta) |
|----------------------------------|-------------|----------------------------------|-------------|--|
| A – Económico | | B – Social | | |
| A – Económico | | C – Medioambiental | | |
| A – Económico | | D – Tecnológico | | |
| B – Social | | C – Medioambiental | | |
| B – Social | | D – Tecnológico | | |
| C – Medioambiental | | D – Tecnológico | | |

| Criterio a comparar (<i>i</i>) | $C_i > C_j$ | Criterio a comparar (<i>j</i>) | $C_j > C_i$ | ¿En qué medida cree que es más importante? (Utilice la escala propuesta) |
|----------------------------------|-------------|----------------------------------|-------------|--|
| A.1 – Inversión | | A.2 – Coste de mantenimiento | | |
| A.1 – Inversión | | A.3 – Ahorro | | |
| A.2 – Coste de mantenimiento | | A.3 – Ahorro | | |

| Criterio a comparar (<i>i</i>) | $C_i > C_j$ | Criterio a comparar (<i>j</i>) | $C_j > C_i$ | ¿En qué medida cree que es más importante? (Utilice la escala propuesta) |
|-------------------------------------|-------------|-------------------------------------|-------------|--|
| B.1 – Aceptación social | | B.2 – Mejora condiciones de trabajo | | |
| B.1 – Aceptación social | | B.3 – Capacitación del personal | | |
| B.2 – Mejora condiciones de trabajo | | B.3 – Capacitación del personal | | |

| Criterio a comparar (<i>i</i>) | $C_i > C_j$ | Criterio a comparar (<i>j</i>) | $C_j > C_i$ | ¿En qué medida cree que es más importante? (Utilice la escala propuesta) |
|----------------------------------|-------------|----------------------------------|-------------|--|
| C.1 – Emisiones | | C.2 – Congestión | | |

| Criterio a comparar (<i>i</i>) | $C_i > C_j$ | Criterio a comparar (<i>j</i>) | $C_j > C_i$ | ¿En qué medida cree que es más importante? (Utilice la escala propuesta) |
|----------------------------------|-------------|----------------------------------|-------------|--|
| D.1 – Madurez tecnológica | | D.2 – Cambio tecnológico | | |
| D.1 – Madurez tecnológica | | D.3 – Optimización operativa | | |
| D.2 – Cambio tecnológico | | D.3 – Optimización operativa | | |

C. Comparación de alternativas

Alternativa 1 → Sistema de propulsión del vehículo
 Alternativa 2 → Optimización de ruta

Alternativa 3 → Optimización de carga
 Alternativa 4 → Trazabilidad de la operación

Desde el punto de vista del criterio señalado en la cabecera de cada tabla tenidos en cuenta en la operación de transporte de mercancías, ¿en qué medida cree que es más importante para cada pareja de alternativas propuesta? **RELENE** siguiendo la misma metodología que en el apartado anterior.

| A.1 – Inversión | | | | |
|--------------------------------|-------------|--------------------------------|-------------|--|
| Alternativa <i>i</i> (A_i) | $A_i > A_j$ | Alternativa <i>j</i> (A_j) | $A_j > A_i$ | ¿En qué medida cree que es más importante? (Utilice la escala propuesta) |
| A1 – Sistema propulsión | | A2 – Optimización ruta | | |
| A1 – Sistema propulsión | | A3 – Optimización carga | | |
| A1 – Sistema propulsión | | A4 – Trazabilidad | | |
| A2 – Optimización ruta | | A3 – Optimización carga | | |
| A2 – Optimización ruta | | A4 – Trazabilidad | | |
| A3 – Optimización carga | | A4 – Trazabilidad | | |

| A.2 – Coste de mantenimiento | | | | |
|--------------------------------|-------------|--------------------------------|-------------|--|
| Alternativa <i>i</i> (A_i) | $A_i > A_j$ | Alternativa <i>j</i> (A_j) | $A_j > A_i$ | ¿En qué medida cree que es más importante? (Utilice la escala propuesta) |
| A1 – Sistema propulsión | | A2 – Optimización ruta | | |
| A1 – Sistema propulsión | | A3 – Optimización carga | | |
| A1 – Sistema propulsión | | A4 – Trazabilidad | | |
| A2 – Optimización ruta | | A3 – Optimización carga | | |
| A2 – Optimización ruta | | A4 – Trazabilidad | | |
| A3 – Optimización carga | | A4 – Trazabilidad | | |

| A.3 – Ahorro | | | | |
|--------------------------------|-------------|--------------------------------|-------------|--|
| Alternativa <i>i</i> (A_i) | $A_i > A_j$ | Alternativa <i>j</i> (A_j) | $A_j > A_i$ | ¿En qué medida cree que es más importante? (Utilice la escala propuesta) |
| A1 – Sistema propulsión | | A2 – Optimización ruta | | |
| A1 – Sistema propulsión | | A3 – Optimización carga | | |
| A1 – Sistema propulsión | | A4 – Trazabilidad | | |
| A2 – Optimización ruta | | A3 – Optimización carga | | |
| A2 – Optimización ruta | | A4 – Trazabilidad | | |
| A3 – Optimización carga | | A4 – Trazabilidad | | |

| B.1 – Aceptación social | | | | |
|--------------------------------|-------------|--------------------------------|-------------|--|
| Alternativa <i>i</i> (A_i) | $A_i > A_j$ | Alternativa <i>j</i> (A_j) | $A_j > A_i$ | ¿En qué medida cree que es más importante? (Utilice la escala propuesta) |
| A1 – Sistema propulsión | | A2 – Optimización ruta | | |
| A1 – Sistema propulsión | | A3 – Optimización carga | | |
| A1 – Sistema propulsión | | A4 – Trazabilidad | | |
| A2 – Optimización ruta | | A3 – Optimización carga | | |
| A2 – Optimización ruta | | A4 – Trazabilidad | | |
| A3 – Optimización carga | | A4 – Trazabilidad | | |

| B.2 – Mejora condiciones de trabajo | | | | |
|-------------------------------------|-------------|--------------------------------|-------------|--|
| Alternativa <i>i</i> (A_i) | $A_i > A_j$ | Alternativa <i>j</i> (A_j) | $A_j > A_i$ | ¿En qué medida cree que es más importante? (Utilice la escala propuesta) |
| A1 – Sistema propulsión | | A2 – Optimización ruta | | |
| A1 – Sistema propulsión | | A3 – Optimización carga | | |
| A1 – Sistema propulsión | | A4 – Trazabilidad | | |
| A2 – Optimización ruta | | A3 – Optimización carga | | |
| A2 – Optimización ruta | | A4 – Trazabilidad | | |
| A3 – Optimización carga | | A4 – Trazabilidad | | |

| B.3 – Capacitación del personal | | | | |
|---------------------------------|-------------|--------------------------------|-------------|--|
| Alternativa <i>i</i> (A_i) | $A_i > A_j$ | Alternativa <i>j</i> (A_j) | $A_j > A_i$ | ¿En qué medida cree que es más importante? (Utilice la escala propuesta) |
| A1 – Sistema propulsión | | A2 – Optimización ruta | | |
| A1 – Sistema propulsión | | A3 – Optimización carga | | |
| A1 – Sistema propulsión | | A4 – Trazabilidad | | |
| A2 – Optimización ruta | | A3 – Optimización carga | | |
| A2 – Optimización ruta | | A4 – Trazabilidad | | |
| A3 – Optimización carga | | A4 – Trazabilidad | | |

| C.1 – Emisiones | | | | |
|--------------------------------|-------------|--------------------------------|-------------|--|
| Alternativa <i>i</i> (A_i) | $A_i > A_j$ | Alternativa <i>j</i> (A_j) | $A_j > A_i$ | ¿En qué medida cree que es más importante? (Utilice la escala propuesta) |
| A1 – Sistema propulsión | | A2 – Optimización ruta | | |
| A1 – Sistema propulsión | | A3 – Optimización carga | | |
| A1 – Sistema propulsión | | A4 – Trazabilidad | | |
| A2 – Optimización ruta | | A3 – Optimización carga | | |
| A2 – Optimización ruta | | A4 – Trazabilidad | | |
| A3 – Optimización carga | | A4 – Trazabilidad | | |

Anexo 3

| C.2 – Congestión | | | | |
|--------------------------------|-------------|--------------------------------|-------------|--|
| Alternativa <i>i</i> (A_i) | $A_i > A_j$ | Alternativa <i>j</i> (A_j) | $A_j > A_i$ | ¿En qué medida cree que es más importante? (Utilice la escala propuesta) |
| A1 – Sistema propulsión | | A2 – Optimización ruta | | |
| A1 – Sistema propulsión | | A3 – Optimización carga | | |
| A1 – Sistema propulsión | | A4 – Trazabilidad | | |
| A2 – Optimización ruta | | A3 – Optimización carga | | |
| A2 – Optimización ruta | | A4 – Trazabilidad | | |
| A3 – Optimización carga | | A4 – Trazabilidad | | |

| D.1 – Madurez de la tecnología | | | | |
|--------------------------------|-------------|--------------------------------|-------------|--|
| Alternativa <i>i</i> (A_i) | $A_i > A_j$ | Alternativa <i>j</i> (A_j) | $A_j > A_i$ | ¿En qué medida cree que es más importante? (Utilice la escala propuesta) |
| A1 – Sistema propulsión | | A2 – Optimización ruta | | |
| A1 – Sistema propulsión | | A3 – Optimización carga | | |
| A1 – Sistema propulsión | | A4 – Trazabilidad | | |
| A2 – Optimización ruta | | A3 – Optimización carga | | |
| A2 – Optimización ruta | | A4 – Trazabilidad | | |
| A3 – Optimización carga | | A4 – Trazabilidad | | |

| D.2 – Cambio tecnológico | | | | |
|--------------------------------|-------------|--------------------------------|-------------|--|
| Alternativa <i>i</i> (A_i) | $A_i > A_j$ | Alternativa <i>j</i> (A_j) | $A_j > A_i$ | ¿En qué medida cree que es más importante? (Utilice la escala propuesta) |
| A1 – Sistema propulsión | | A2 – Optimización ruta | | |
| A1 – Sistema propulsión | | A3 – Optimización carga | | |
| A1 – Sistema propulsión | | A4 – Trazabilidad | | |
| A2 – Optimización ruta | | A3 – Optimización carga | | |
| A2 – Optimización ruta | | A4 – Trazabilidad | | |
| A3 – Optimización carga | | A4 – Trazabilidad | | |

| D.3 – Optimización operativa | | | | |
|--------------------------------|-------------|--------------------------------|-------------|--|
| Alternativa <i>i</i> (A_i) | $A_i > A_j$ | Alternativa <i>j</i> (A_j) | $A_j > A_i$ | ¿En qué medida cree que es más importante? (Utilice la escala propuesta) |
| A1 – Sistema propulsión | | A2 – Optimización ruta | | |
| A1 – Sistema propulsión | | A3 – Optimización carga | | |
| A1 – Sistema propulsión | | A4 – Trazabilidad | | |
| A2 – Optimización ruta | | A3 – Optimización carga | | |
| A2 – Optimización ruta | | A4 – Trazabilidad | | |
| A3 – Optimización carga | | A4 – Trazabilidad | | |

Anexo 4. Valoraciones de los expertos

En las siguientes tablas se recogen todos los resultados extraídos de los cuestionarios proporcionados a los expertos. En este trabajo se ha contado con la participación de 5 expertos distintos, pertenecientes a empresas u organizaciones relacionadas con el sector del transporte tales como Carreras, Marcotran, ZLC (Zaragoza Logistics Center) e ITA (Instituto Tecnológico de Aragón).

| | | C1 | C2 | C3 | C4 |
|----|--|-----------|-----|-----|-----|
| | | Experto 1 | 7 | 3 | 3 |
| C1 | | Experto 2 | 7 | 3 | 3 |
| C1 | | Experto 3 | 9 | 7 | 3 |
| C1 | | Experto 4 | 1/5 | 1/7 | 3 |
| C1 | | Experto 5 | 5 | 5 | 5 |
| | | Experto 1 | 1 | 1/3 | 1/3 |
| C2 | | Experto 2 | 1 | 1/3 | 1/3 |
| C2 | | Experto 3 | 1 | 1/3 | 1/5 |
| C2 | | Experto 4 | 5 | 5 | 5 |
| C2 | | Experto 5 | 1 | 1/3 | 1/5 |
| | | Experto 1 | 3 | 1 | 1/3 |
| C3 | | Experto 2 | 3 | 1 | 1 |
| C3 | | Experto 3 | 3 | 1 | 1/3 |
| C3 | | Experto 4 | 1/5 | 1 | 7 |
| C3 | | Experto 5 | 3 | 1 | 1 |
| | | Experto 1 | 3 | 3 | 1 |
| C4 | | Experto 2 | 3 | 1 | 1 |
| C4 | | Experto 3 | 5 | 3 | 1 |
| C4 | | Experto 4 | 1/5 | 1/7 | 1 |
| C4 | | Experto 5 | 5 | 1 | 1 |

Tabla 1. Valoraciones de los expertos para los criterios de primer nivel

| | | SC1.1 | SC1.2 | SC1.3 |
|-------|--|-----------|-------|-------|
| | | Experto 1 | 3 | 7 |
| SC1.1 | | Experto 2 | 3 | 1/3 |
| SC1.1 | | Experto 3 | 1/5 | 1/5 |
| SC1.1 | | Experto 4 | 1/3 | 1/5 |
| SC1.1 | | Experto 5 | 1/5 | 1/5 |
| | | Experto 1 | 1 | 1/5 |
| SC1.2 | | Experto 2 | 1 | 1/5 |
| SC1.2 | | Experto 3 | 1 | 1 |
| SC1.2 | | Experto 4 | 7 | 1 |
| SC1.2 | | Experto 5 | 1 | 1/5 |
| | | Experto 1 | 5 | 1 |
| SC1.3 | | Experto 2 | 5 | 1 |
| SC1.3 | | Experto 3 | 1 | 1 |
| SC1.3 | | Experto 4 | 1/7 | 1 |
| SC1.3 | | Experto 5 | 5 | 1 |

Tabla 2. Valoraciones de los expertos para los subcriterios del criterio C1 (Económico)

| | | SC2.1 | SC2.2 | SC2.3 |
|-------|-----------|-------|-------|-------|
| SC2.1 | Experto 1 | 1 | 1/5 | 1/3 |
| | Experto 2 | 1 | 1/3 | 1/3 |
| | Experto 3 | 1 | 7 | 9 |
| | Experto 4 | 1 | 1/3 | 1/3 |
| | Experto 5 | 1 | 1/5 | 1/3 |
| SC2.2 | Experto 1 | 5 | 1 | 5 |
| | Experto 2 | 3 | 1 | 1 |
| | Experto 3 | 1/7 | 1 | 3 |
| | Experto 4 | 3 | 1 | 5 |
| | Experto 5 | 5 | 1 | 3 |
| SC2.3 | Experto 1 | 3 | 1/5 | 1 |
| | Experto 2 | 3 | 1 | 1 |
| | Experto 3 | 1/9 | 1/3 | 1 |
| | Experto 4 | 3 | 1/5 | 1 |
| | Experto 5 | 3 | 1/3 | 1 |

Tabla 3. Valoraciones de los expertos para los subcriterios del criterio C2 (Social)

| | | SC3.1 | SC3.2 |
|-------|-----------|-------|-------|
| SC3.1 | Experto 1 | 1 | 3 |
| | Experto 2 | 1 | 1/3 |
| | Experto 3 | 1 | 1 |
| | Experto 4 | 1 | 1/9 |
| | Experto 5 | 1 | 1/7 |
| SC3.2 | Experto 1 | 1/3 | 1 |
| | Experto 2 | 3 | 1 |
| | Experto 3 | 1 | 1 |
| | Experto 4 | 9 | 1 |
| | Experto 5 | 7 | 1 |

Tabla 4. Valoraciones de los expertos para los subcriterios del criterio C3 (Medioambiental)

| | | SC4.1 | SC4.2 | SC4.3 |
|-------|-----------|-------|-------|-------|
| SC4.1 | Experto 1 | 1 | 5 | 1/7 |
| | Experto 2 | 1 | 1 | 1/3 |
| | Experto 3 | 1 | 1/7 | 1/7 |
| | Experto 4 | 1 | 1 | 1/7 |
| | Experto 5 | 1 | 3 | 1/5 |
| SC4.2 | Experto 1 | 1/5 | 1 | 1/7 |
| | Experto 2 | 1 | 1 | 1/3 |
| | Experto 3 | 7 | 1 | 1 |
| | Experto 4 | 1 | 1 | 1/7 |
| | Experto 5 | 1/3 | 1 | 1/3 |
| SC4.3 | Experto 1 | 7 | 7 | 1 |
| | Experto 2 | 3 | 3 | 1 |
| | Experto 3 | 7 | 1 | 1 |
| | Experto 4 | 7 | 7 | 1 |
| | Experto 5 | 5 | 3 | 1 |

Tabla 5. Valoraciones de los expertos para los subcriterios del criterio C4 (Tecnológico)

| | | SC1.1 – Inversión | | | |
|------|-----------|-------------------|------|------|------|
| | | ALT1 | ALT2 | ALT3 | ALT4 |
| ALT1 | Experto 1 | 1 | 3 | 5 | 5 |
| | Experto 2 | 1 | 3 | 5 | 5 |
| | Experto 3 | 1 | 7 | 7 | 5 |
| | Experto 4 | 1 | 7 | 7 | 7 |
| | Experto 5 | 1 | 5 | 5 | 5 |
| ALT2 | Experto 1 | 1/3 | 1 | 3 | 5 |
| | Experto 2 | 1/3 | 1 | 3 | 1 |
| | Experto 3 | 1/7 | 1 | 1 | 1/5 |
| | Experto 4 | 1/7 | 1 | 1/5 | 5 |
| | Experto 5 | 1/5 | 1 | 5 | 3 |
| ALT3 | Experto 1 | 1/5 | 1/3 | 1 | 5 |
| | Experto 2 | 1/5 | 1/3 | 1 | 1/3 |
| | Experto 3 | 1/7 | 1 | 1 | 1/5 |
| | Experto 4 | 1/7 | 5 | 1 | 1 |
| | Experto 5 | 1/5 | 1/5 | 1 | 1/3 |
| ALT4 | Experto 1 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 1 |
| | Experto 2 | 1/5 | 1 | 3 | 1 |
| | Experto 3 | 1/5 | 5 | 5 | 1 |
| | Experto 4 | 1/7 | 1/5 | 1 | 1 |
| | Experto 5 | 1/5 | 1/3 | 3 | 1 |

Tabla 6. Valoraciones de los expertos para las alternativas en el subcriterio SC1.1 – Inversión

| | | SC1.2 – Coste mantenimiento | | | |
|------|-----------|-----------------------------|------|------|------|
| | | ALT1 | ALT2 | ALT3 | ALT4 |
| ALT1 | Experto 1 | 1 | 7 | 7 | 7 |
| | Experto 2 | 1 | 3 | 5 | 3 |
| | Experto 3 | 1 | 1/5 | 1/5 | 1/3 |
| | Experto 4 | 1 | 9 | 9 | 9 |
| | Experto 5 | 1 | 7 | 5 | 7 |
| ALT2 | Experto 1 | 1/7 | 1 | 3 | 3 |
| | Experto 2 | 1/3 | 1 | 5 | 3 |
| | Experto 3 | 5 | 1 | 1 | 3 |
| | Experto 4 | 1/9 | 1 | 1 | 5 |
| | Experto 5 | 1/7 | 1 | 3 | 5 |
| ALT3 | Experto 1 | 1/7 | 1/3 | 1 | 3 |
| | Experto 2 | 1/5 | 1/5 | 1 | 1/3 |
| | Experto 3 | 5 | 1 | 1 | 3 |
| | Experto 4 | 1/9 | 1 | 1 | 5 |
| | Experto 5 | 1/5 | 1/3 | 1 | 3 |
| ALT4 | Experto 1 | 1/7 | 1/3 | 1/3 | 1 |
| | Experto 2 | 1/3 | 1/3 | 3 | 1 |
| | Experto 3 | 3 | 1/3 | 1/3 | 1 |
| | Experto 4 | 1/9 | 1/5 | 1/5 | 1 |
| | Experto 5 | 1/7 | 1/5 | 1/3 | 1 |

Tabla 7. Valoraciones de los expertos para las alternativas en el subcriterio SC1.2 – Coste de mantenimiento

| | | SC1.3 – Ahorro | | | |
|------|-----------|----------------|------|------|------|
| | | ALT1 | ALT2 | ALT3 | ALT4 |
| ALT1 | Experto 1 | 1 | 5 | 5 | 7 |
| | Experto 2 | 1 | 1 | 1 | 3 |
| | Experto 3 | 1 | 1/5 | 1/5 | 1/3 |
| | Experto 4 | 1 | 3 | 3 | 3 |
| | Experto 5 | 1 | 5 | 5 | 5 |
| ALT2 | Experto 1 | 1/5 | 1 | 3 | 7 |
| | Experto 2 | 1 | 1 | 3 | 5 |
| | Experto 3 | 5 | 1 | 1 | 3 |
| | Experto 4 | 1/3 | 1 | 1/7 | 7 |
| | Experto 5 | 1/5 | 1 | 3 | 3 |
| ALT3 | Experto 1 | 1/5 | 1/3 | 1 | 5 |
| | Experto 2 | 1 | 1/3 | 1 | 5 |
| | Experto 3 | 5 | 1 | 1 | 3 |
| | Experto 4 | 1/3 | 7 | 1 | 7 |
| | Experto 5 | 1/5 | 1/3 | 1 | 5 |
| ALT4 | Experto 1 | 1/7 | 1/7 | 1/5 | 1 |
| | Experto 2 | 1/3 | 1/5 | 1/5 | 1 |
| | Experto 3 | 3 | 1/3 | 1/3 | 1 |
| | Experto 4 | 1/3 | 1/7 | 1/7 | 1 |
| | Experto 5 | 1/5 | 1/3 | 1/5 | 1 |

Tabla 8. Valoraciones de los expertos para las alternativas en el subcriterio SC1.3 – Ahorro

| | | SC2.1 – Aceptación social | | | |
|------|-----------|---------------------------|------|------|------|
| | | ALT1 | ALT2 | ALT3 | ALT4 |
| ALT1 | Experto 1 | 1 | 5 | 5 | 5 |
| | Experto 2 | 1 | 5 | 7 | 3 |
| | Experto 3 | 1 | 5 | 5 | 3 |
| | Experto 4 | 1 | 9 | 9 | 9 |
| | Experto 5 | 1 | 7 | 5 | 3 |
| ALT2 | Experto 1 | 1/5 | 1 | 3 | 3 |
| | Experto 2 | 1/5 | 1 | 1 | 1/5 |
| | Experto 3 | 1/5 | 1 | 1 | 1/3 |
| | Experto 4 | 1/9 | 1 | 1/5 | 5 |
| | Experto 5 | 1/7 | 1 | 3 | 5 |
| ALT3 | Experto 1 | 1/5 | 1/3 | 1 | 3 |
| | Experto 2 | 1/7 | 1 | 1 | 1/7 |
| | Experto 3 | 1/5 | 1 | 1 | 1/3 |
| | Experto 4 | 1/9 | 5 | 1 | 5 |
| | Experto 5 | 1/5 | 1/3 | 1 | 1 |
| ALT4 | Experto 1 | 1/5 | 1/3 | 1/3 | 1 |
| | Experto 2 | 1/3 | 5 | 7 | 1 |
| | Experto 3 | 1/3 | 3 | 3 | 1 |
| | Experto 4 | 1/9 | 1/5 | 1/5 | 1 |
| | Experto 5 | 1/3 | 1/5 | 1 | 1 |

Tabla 9. Valoraciones de los expertos para las alternativas en el subcriterio SC2.1 – Aceptación social

| | | SC2.2 – Mejora condiciones de trabajo | | | |
|------|-----------|---------------------------------------|------|------|------|
| | | ALT1 | ALT2 | ALT3 | ALT4 |
| ALT1 | Experto 1 | 1 | 3 | 3 | 3 |
| | Experto 2 | 1 | 1 | 3 | 1 |
| | Experto 3 | 1 | 1/5 | 1/5 | 1/5 |
| | Experto 4 | 1 | 1/7 | 1/7 | 1/7 |
| | Experto 5 | 1 | 1/5 | 1/3 | 1 |
| ALT2 | Experto 1 | 1/3 | 1 | 3 | 3 |
| | Experto 2 | 1 | 1 | 1/3 | 1 |
| | Experto 3 | 5 | 1 | 1 | 3 |
| | Experto 4 | 7 | 1 | 5 | 5 |
| | Experto 5 | 5 | 1 | 3 | 5 |
| ALT3 | Experto 1 | 1/3 | 1/3 | 1 | 3 |
| | Experto 2 | 1/3 | 3 | 1 | 3 |
| | Experto 3 | 5 | 1 | 1 | 3 |
| | Experto 4 | 7 | 1/5 | 1 | 1/5 |
| | Experto 5 | 3 | 1/3 | 1 | 5 |
| ALT4 | Experto 1 | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1 |
| | Experto 2 | 1 | 1 | 1/3 | 1 |
| | Experto 3 | 5 | 1/3 | 1/3 | 1 |
| | Experto 4 | 7 | 1/5 | 5 | 1 |
| | Experto 5 | 1 | 1/5 | 1/5 | 1 |

Tabla 10. Valoraciones de los expertos para las alternativas en el subcriterio SC2.2 – Mejora de condiciones de trabajo

| | | SC2.3 – Capacitación del personal | | | |
|------|-----------|-----------------------------------|------|------|------|
| | | ALT1 | ALT2 | ALT3 | ALT4 |
| ALT1 | Experto 1 | 1 | 3 | 3 | 3 |
| | Experto 2 | 1 | 1/3 | 1/3 | 1 |
| | Experto 3 | 1 | 1/5 | 1/5 | 1/5 |
| | Experto 4 | 1 | 5 | 5 | 7 |
| | Experto 5 | 1 | 3 | 1/3 | 3 |
| ALT2 | Experto 1 | 1/3 | 1 | 3 | 3 |
| | Experto 2 | 3 | 1 | 1 | 3 |
| | Experto 3 | 5 | 1 | 1 | 1 |
| | Experto 4 | 1/5 | 1 | 7 | 3 |
| | Experto 5 | 1/3 | 1 | 5 | 5 |
| ALT3 | Experto 1 | 1/3 | 1/3 | 1 | 3 |
| | Experto 2 | 3 | 1 | 1 | 3 |
| | Experto 3 | 5 | 1 | 1 | 1 |
| | Experto 4 | 1/5 | 1/7 | 1 | 3 |
| | Experto 5 | 3 | 1/5 | 1 | 3 |
| ALT4 | Experto 1 | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1 |
| | Experto 2 | 1 | 1/3 | 1/3 | 1 |
| | Experto 3 | 5 | 1 | 1 | 1 |
| | Experto 4 | 1/7 | 1/3 | 1/3 | 1 |
| | Experto 5 | 1/3 | 1/5 | 1/3 | 1 |

Tabla 11. Valoraciones de los expertos para las alternativas en el subcriterio SC2.3 – Capacitación del personal

| SC3.1 – Emisiones | | | | | |
|-------------------|-----------|------|------|------|------|
| | | ALT1 | ALT2 | ALT3 | ALT4 |
| ALT1 | Experto 1 | 1 | 5 | 5 | 7 |
| | Experto 2 | 1 | 3 | 5 | 7 |
| | Experto 3 | 1 | 1/3 | 1/3 | 5 |
| | Experto 4 | 1 | 9 | 9 | 9 |
| | Experto 5 | 1 | 7 | 5 | 7 |
| ALT2 | Experto 1 | 1/5 | 1 | 3 | 5 |
| | Experto 2 | 1/3 | 1 | 3 | 5 |
| | Experto 3 | 3 | 1 | 1 | 5 |
| | Experto 4 | 1/9 | 1 | 5 | 5 |
| | Experto 5 | 1/7 | 1 | 3 | 5 |
| ALT3 | Experto 1 | 1/5 | 1/3 | 1 | 5 |
| | Experto 2 | 1/5 | 1/3 | 1 | 5 |
| | Experto 3 | 3 | 1 | 1 | 5 |
| | Experto 4 | 1/9 | 1/5 | 1 | 1/5 |
| | Experto 5 | 1/5 | 1/3 | 1 | 5 |
| ALT4 | Experto 1 | 1/7 | 1/5 | 1/5 | 1 |
| | Experto 2 | 1/7 | 1/5 | 1/5 | 1 |
| | Experto 3 | 5 | 1/5 | 1/5 | 1 |
| | Experto 4 | 1/9 | 1/5 | 5 | 1 |
| | Experto 5 | 1/7 | 1/5 | 1/5 | 1 |

Tabla 12. Valoraciones de los expertos para las alternativas en el subcriterio SC3.1 – Emisiones

| SC3.2 – Congestión | | | | | |
|--------------------|-----------|------|------|------|------|
| | | ALT1 | ALT2 | ALT3 | ALT4 |
| ALT1 | Experto 1 | 1 | 1/3 | 1/3 | 5 |
| | Experto 2 | 1 | 1/5 | 1 | 1 |
| | Experto 3 | 1 | 1/9 | 1/9 | 1/7 |
| | Experto 4 | 1 | 1/9 | 1/5 | 1/7 |
| | Experto 5 | 1 | 1/7 | 1/5 | 1/7 |
| ALT2 | Experto 1 | 3 | 1 | 1 | 3 |
| | Experto 2 | 5 | 1 | 7 | 9 |
| | Experto 3 | 9 | 1 | 1 | 7 |
| | Experto 4 | 9 | 1 | 9 | 9 |
| | Experto 5 | 7 | 1 | 7 | 7 |
| ALT3 | Experto 1 | 3 | 1 | 1 | 3 |
| | Experto 2 | 1 | 1/7 | 1 | 1 |
| | Experto 3 | 9 | 1 | 1 | 7 |
| | Experto 4 | 5 | 1/9 | 1 | 1/7 |
| | Experto 5 | 5 | 1/7 | 1 | 5 |
| ALT4 | Experto 1 | 1/5 | 1/3 | 1/3 | 1 |
| | Experto 2 | 1 | 1/9 | 1 | 1 |
| | Experto 3 | 7 | 1/7 | 1/7 | 1 |
| | Experto 4 | 7 | 1/9 | 7 | 1 |
| | Experto 5 | 7 | 1/7 | 1/5 | 1 |

Tabla 13. Valoraciones de los expertos para las alternativas en el subcriterio SC3.2 – Congestión

| SC4.1 – Madurez tecnología | | | | | |
|----------------------------|-----------|------|------|------|------|
| | | ALT1 | ALT2 | ALT3 | ALT4 |
| ALT1 | Experto 1 | 1 | 1/3 | 1/3 | 1 |
| | Experto 2 | 1 | 3 | 5 | 3 |
| | Experto 3 | 1 | 9 | 9 | 9 |
| | Experto 4 | 1 | 1/7 | 7 | 1/7 |
| | Experto 5 | 1 | 3 | 5 | 7 |
| ALT2 | Experto 1 | 3 | 1 | 1 | 1 |
| | Experto 2 | 1/3 | 1 | 3 | 1 |
| | Experto 3 | 1/9 | 1 | 1 | 1/5 |
| | Experto 4 | 7 | 1 | 5 | 1/5 |
| | Experto 5 | 1/3 | 1 | 3 | 1 |
| ALT3 | Experto 1 | 3 | 1 | 1 | 1 |
| | Experto 2 | 1/5 | 1/3 | 1 | 1/3 |
| | Experto 3 | 1/9 | 1 | 1 | 1/5 |
| | Experto 4 | 1/7 | 1/5 | 1 | 1/3 |
| | Experto 5 | 1/5 | 1/3 | 1 | 1 |
| ALT4 | Experto 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Experto 2 | 1/3 | 1 | 3 | 1 |
| | Experto 3 | 1/9 | 5 | 5 | 1 |
| | Experto 4 | 7 | 5 | 3 | 1 |
| | Experto 5 | 1/7 | 1 | 1 | 1 |

Tabla 14. Valoraciones de los expertos para las alternativas en el subcriterio SC4.1 – Madurez de la tecnología

| SC4.2 – Cambio tecnológico | | | | | |
|----------------------------|-----------|------|------|------|------|
| | | ALT1 | ALT2 | ALT3 | ALT4 |
| ALT1 | Experto 1 | 1 | 7 | 7 | 7 |
| | Experto 2 | 1 | 1 | 1 | 3 |
| | Experto 3 | 1 | 3 | 3 | 3 |
| | Experto 4 | 1 | 7 | 7 | 7 |
| | Experto 5 | 1 | 5 | 5 | 3 |
| ALT2 | Experto 1 | 1/7 | 1 | 1 | 3 |
| | Experto 2 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Experto 3 | 1/3 | 1 | 1 | 1/5 |
| | Experto 4 | 1/7 | 1 | 1/3 | 1/3 |
| | Experto 5 | 1/5 | 1 | 1 | 3 |
| ALT3 | Experto 1 | 1/7 | 1 | 1 | 7 |
| | Experto 2 | 1 | 1 | 1 | 3 |
| | Experto 3 | 1/3 | 1 | 1 | 1/5 |
| | Experto 4 | 1/7 | 3 | 1 | 1/3 |
| | Experto 5 | 1/5 | 1 | 1 | 1/3 |
| ALT4 | Experto 1 | 1/7 | 1/3 | 1/3 | 1 |
| | Experto 2 | 1/3 | 1 | 1/3 | 1 |
| | Experto 3 | 1/3 | 5 | 5 | 1 |
| | Experto 4 | 1/7 | 3 | 3 | 1 |
| | Experto 5 | 1/3 | 1/3 | 3 | 1 |

Tabla 15. Valoraciones de los expertos para las alternativas en el subcriterio SC4.2 – Cambio tecnológico

| | | SC4.3 – Optimización operativa | | | |
|------|-----------|--------------------------------|------|------|------|
| | | ALT1 | ALT2 | ALT3 | ALT4 |
| ALT1 | Experto 1 | 1 | 1/5 | 1/5 | 5 |
| | Experto 2 | 1 | 1/7 | 1/5 | 1 |
| | Experto 3 | 1 | 1/9 | 1/9 | 1/7 |
| | Experto 4 | 1 | 1/7 | 1/7 | 1/7 |
| | Experto 5 | 1 | 1/7 | 1/7 | 1/5 |
| ALT2 | Experto 1 | 5 | 1 | 1/3 | 5 |
| | Experto 2 | 7 | 1 | 1 | 5 |
| | Experto 3 | 9 | 1 | 1 | 3 |
| | Experto 4 | 7 | 1 | 5 | 5 |
| | Experto 5 | 7 | 1 | 3 | 3 |
| ALT3 | Experto 1 | 5 | 3 | 1 | 5 |
| | Experto 2 | 5 | 1 | 1 | 3 |
| | Experto 3 | 9 | 1 | 1 | 3 |
| | Experto 4 | 7 | 1/5 | 1 | 1/5 |
| | Experto 5 | 7 | 1/3 | 1 | 5 |
| ALT4 | Experto 1 | 1/5 | 1/5 | 1/5 | 1 |
| | Experto 2 | 1 | 1/5 | 1/3 | 1 |
| | Experto 3 | 7 | 1/3 | 1/3 | 1 |
| | Experto 4 | 7 | 1/5 | 5 | 1 |
| | Experto 5 | 5 | 1/3 | 1/5 | 1 |

Tabla 16. Valoraciones de los expertos para las alternativas en el subcriterio SC4.3 – Optimización operativa