



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER ESTRATEGIA DE ELECTRIFICACIÓN PARA UNA FLOTA DE VEHÍCULOS DE TRANSPORTE DE DINERO EN EFECTIVO

Autor: Javier Laguna Núñez

Director: Andrés Diego Díaz Casado

Director: José Manuel Castañeda Arronte

Director: Pablo Frías Marín

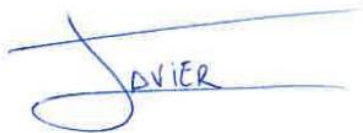
Madrid

Agosto 2021

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
“Estrategia de electrificación para una flota de vehículos de transporte de dinero en
efectivo”

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2020/2021 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Javier Laguna Núñez

Fecha: 30 / 08 / 2021

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Andrés Diego Díaz Casado

Fecha: 30 / 08 / 2021



Fdo.: José Manuel Castañeda Arronte

Fecha: 30 / 08 / 2021



Fdo.: Pablo Frías Marín

Fecha: 30 / 08 / 2021

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESINAS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. Javier Laguna Núñez

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra:

“Estrategia de electrificación para una flota de vehículos de transporte de dinero en efectivo”,

que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducirla en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que

podieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.

- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

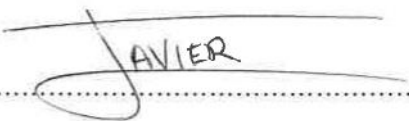
6°. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a ...30... de Agosto..... de ..2021

ACEPTA

Fdo.....


Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ESTRATEGIA DE ELECTRIFICACIÓN PARA UNA FLOTA DE VEHÍCULOS DE TRANSPORTE DE DINERO EN EFECTIVO

Autor: Javier Laguna Núñez

Director: Andrés Diego Díaz Casado

Director: José Manuel Castañeda Arronte

Director: Pablo Frías Marín

Madrid

Agosto 2021

Índice

1	Transporte de última milla	35
1.1	Introducción	35
1.2	Problema medioambiental	35
1.2.1	Regulaciones.....	35
1.3	Vehículo eléctrico	39
1.3.1	Baterías eléctricas	41
1.4	Vehículos Blindados	43
1.5	Transporte sostenible en entornos urbanos	44
1.5.1	Contaminación acústica	45
1.5.2	Contaminación ambiental	47
1.5.3	Congestión del tráfico urbano. Optimización de rutas	52
1.6	Evolución del transporte de mercancías en núcleos urbanos.....	56
1.7	Optimización del proceso de electrificación de una flota comercial	61
1.8	Conclusión	62
2	Metodología	63
2.1	Introducción	63
2.2	Nomenclatura.....	63
2.2.1	Índices.....	63
2.2.2	Parámetros	63
2.2.3	Variables	65
2.3	Diagrama de flujos.....	67
2.3.1	Diagrama de bloques	67
2.3.2	Análisis económico	68
2.3.3	Cálculo de los subsidios	69
2.3.4	Selección de vehículos a reemplazar	70
2.3.5	Optimización de los vehículos a incorporar	71
2.4	Desarrollo conceptual	72
2.4.1	Análisis económico de los vehículos del mercado	72
2.4.2	Cálculo del subsidio	78
2.4.3	Elección de los vehículos a retirar de la flota.....	79
2.4.4	Optimización de los vehículos a incorporar en la flota	81
2.5	Descripción del software	85
2.6	Conclusión	86

3	Aplicación al caso de estudio de Loomis	87
3.1	Introducción	87
3.2	Datos de la flota actual.....	87
3.3	Datos de los vehículos del mercado.....	90
3.4	Simulación 1: Caso base	90
3.4.1	Parámetros	90
3.4.2	Estudio Económico.....	91
3.4.3	Estudio Medioambiental.....	95
3.5	Simulación 2: Disminución del objetivo de reducción de emisiones al 30% ..	97
3.5.1	Parámetros	97
3.5.2	Estudio Económico.....	98
3.5.3	Estudio Medioambiental.....	101
3.6	Simulación 3: El precio del diésel sube de 0,85€/litro a 1,2€/litro	104
3.6.1	Parámetros	104
3.6.2	Estudio Económico.....	105
3.6.3	Estudio Medioambiental.....	108
3.7	Simulación 4: La duración del estudio disminuye de 9 años a 6 años.....	110
3.7.1	Parámetros	110
3.7.2	Estudio Económico.....	111
3.7.3	Estudio Medioambiental.....	114
3.8	Simulación 5: El precio de la electricidad aumenta de 0,12€/kWh a 0,2€/kWh 116	
3.8.1	Parámetros	116
3.8.2	Estudio Económico.....	117
3.8.3	Estudio Medioambiental.....	120
3.9	Simulación 6: La tasa de reemplazo se reduce del 10% al 5%	123
3.9.1	Parámetros	123
3.9.2	Estudio Económico.....	124
3.9.3	Estudio Medioambiental.....	126
3.10	Simulación 7: El gobierno retira los subsidios	128
3.10.1	Parámetros	128
3.10.2	Estudio Económico.....	129
3.10.3	Estudio Medioambiental.....	132
3.11	Conclusiones	134
4	Replicabilidad y Escalabilidad a otros sectores y entornos.....	137

4.1	Introducción	137
4.2	Replicabilidad	137
4.2.1	Simulación de replicabilidad	139
4.3	Escalabilidad	145
4.3.1	Simulación de escalabilidad	146
4.4	Conclusiones	154
5	Conclusiones y futuros desarrollos	155
5.1.1	Conclusiones del proyecto.....	155
5.1.2	Impacto del estudio en los ODS	159
5.1.3	Futuros desarrollos	167
6	Referencias	169
7	Anexos.....	173
7.1	Código de Matlab.....	173
7.2	Manual de usuario – Español.....	198
7.2.1	Objetivo de la herramienta	198
7.2.2	Definición de la herramienta	198
7.2.3	Instalación de la herramienta.....	198
7.2.4	Instrucciones de uso	200
7.2.5	Interpretación de los resultados	203
7.3	User Manual.....	206
7.3.1	Objective of the tool	206
7.3.2	Definition of the tool	206
7.3.3	Installation of the tool.....	206
7.3.4	Instructions for use	207
7.3.5	Interpretation of the results.....	211

Tabla de contenido

Tablas

Tabla 1: Resumen de las simulaciones del caso de estudio de Loomis.....	23
Tabla 2: Resumen de las simulaciones realizadas en el proyecto	25
Tabla 3: Resumen de las simulaciones del caso de estudio de Loomis - Inglés.....	32
Tabla 4: Resumen de las simulaciones realizadas en el proyecto – Inglés.....	34
Tabla 5: Niveles de blindaje según el Estándar Europeo	44
Tabla 6: Nivel de intensidad del sonido	45
Tabla 7: Encuesta sobre el silencio del vehículo eléctrico	47
Tabla 8: Categorías de ciudades según su concentración de PM 2.5	49
Tabla 9: Ranking de las ciudades más contaminadas del mundo.....	49
Tabla 10: Ranking de las ciudades más contaminadas de Europa	50
Tabla 11: Ranking de las ciudades más contaminadas de España	51
Tabla 12: Nomenclatura de los índices usados en la metodología	63
Tabla 13: Nomenclatura de los parámetros generales usados en la metodología	63
Tabla 14: Nomenclatura de los parámetros económicos usados en la metodología	64
Tabla 15: Nomenclatura de los parámetros de reemplazo usados en la metodología	65
Tabla 16: Nomenclatura de las variables generales usadas en la metodología	65
Tabla 17: Nomenclatura de las variables económicas usadas en la metodología	65
Tabla 18: Nomenclatura de las variables de reemplazo usadas en la metodología.....	66
Tabla 19: Nomenclatura de las variables de optimización usadas en la metodología....	66
Tabla 20: Flujo de caja del análisis económico de los vehículos del mercado	73
Tabla 21: Evolución del precio de los vehículos eléctricos.....	74
Tabla 22: Datos de los vehículos de la flota actual de Loomis	89
Tabla 23: Datos de los vehículos disponibles en el mercado	90
Tabla 24: Simulación 1: Parámetros.....	91
Tabla 25: Simulación 1: NPV de los vehículos del mercado	92
Tabla 26: Simulación 1: Vehículos a retirar e incorporar en cada año del estudio	94
Tabla 27: Simulación 1: Resumen de los resultados del estudio económico	95
Tabla 28: Simulación 1: Resumen de los resultados del estudio medioambiental.....	97
Tabla 29: Simulación 2: Parámetros.....	97
Tabla 30: Simulación 2: NPV de los vehículos del mercado	98
Tabla 31: Simulación 2: Vehículos a retirar e incorporar en cada año del estudio	100
Tabla 32: Simulación 2: Resumen de los resultados del estudio económico	101
Tabla 33: Simulación 2: Resumen de los resultados del estudio medioambiental.....	103
Tabla 34: Simulación 3: Parámetros.....	104
Tabla 35: Simulación 3: NPV de los vehículos del mercado	105
Tabla 36: Simulación 3: Vehículos a retirar e incorporar en cada año del estudio	107
Tabla 37: Simulación 3: Resumen de los resultados del estudio económico	108
Tabla 38: Simulación 3: Resumen de los resultados del estudio medioambiental.....	110
Tabla 39: Simulación 4: Parámetros.....	111
Tabla 40: Simulación 4: NPV de los vehículos del mercado	112
Tabla 41: Simulación 4: Vehículos a retirar e incorporar en cada año del estudio	113
Tabla 42: Simulación 4: Resumen de los resultados del estudio económico	114

Tabla 43: Simulación 4: Resumen de los resultados del estudio medioambiental.....	115
Tabla 44: Simulación 5: Parámetros.....	116
Tabla 45: Simulación 5: NPV de los vehículos del mercado	118
Tabla 46: Simulación 5: Vehículos a retirar e incorporar en cada año del estudio	119
Tabla 47: Simulación 5: Resumen de los resultados del estudio económico	120
Tabla 48: Simulación 5: Resumen de los resultados del estudio medioambiental.....	122
Tabla 49: Simulación 6: Parámetros.....	123
Tabla 50: Simulación 6: NPV de los vehículos del mercado	124
Tabla 51: Simulación 6: Vehículos a retirar e incorporar en cada año del estudio	125
Tabla 52: Simulación 6: Resumen de los resultados del estudio económico	126
Tabla 53: Simulación 6: Resumen de los resultados del estudio medioambiental.....	128
Tabla 54: Simulación 7: Parámetros.....	128
Tabla 55: Simulación 7: Subsidios anuales para cada vehículo del mercado	129
Tabla 56: Simulación 7: NPV de los vehículos del mercado	130
Tabla 57: Simulación 7: Vehículos a retirar e incorporar en cada año del estudio	131
Tabla 58: Simulación 7: Resumen de los resultados del estudio económico	132
Tabla 59: Simulación 7: Resumen de los resultados del estudio medioambiental.....	134
Tabla 60: Resumen de los resultados de las simulaciones	135
Tabla 61: Simulación Replicabilidad: Parámetros	139
Tabla 62: Simulación Replicabilidad: Datos de la flota actual	140
Tabla 63: Simulación Replicabilidad: Datos de los vehículos en el mercado.....	141
Tabla 64: Simulación Replicabilidad: NPV de los vehículos del mercado.....	141
Tabla 65: Simulación Replicabilidad: Vehículos a retirar e incorporar en cada año del estudio.....	142
Tabla 66: Simulación Replicabilidad: Resumen de los resultados del estudio económico	143
Tabla 67: Simulación Replicabilidad: Resumen de los resultados del estudio medioambiental	144
Tabla 68: Simulación Escalabilidad: Datos de la flota actual	147
Tabla 69: Simulación Escalabilidad: Datos de los vehículos en el mercado.....	148
Tabla 70: Simulación Escalabilidad: Parámetros	148
Tabla 71: Simulación Escalabilidad: NPV de los vehículos del mercado.....	149
Tabla 72: Simulación Escalabilidad: Vehículos a retirar e incorporar en cada año del estudio.....	151
Tabla 73: Simulación Escalabilidad: Resumen de los resultados del estudio económico	152
Tabla 74: Simulación Escalabilidad: Resumen de los resultados del estudio medioambiental	153
Tabla 75: Resumen de los resultados de las simulaciones	157

Tabla de contenido

Ilustraciones

Ilustración 1: Diagrama de cajas de la metodología.....	20
Ilustración 2: Total Cost of Ownership	21
Ilustración 3: Diagrama de caja de la metodología - Inglés	29
Ilustración 4: Total Cost of Ownership - Inglés	30
Ilustración 5: Restricciones de tráfico en Europa.....	38
Ilustración 6: Densidad de paradas de carga y descarga en la ciudad de Madrid.....	61
Ilustración 7: Diagrama de bloques de la metodología	67
Ilustración 8: Diagrama de flujo del análisis económico	68
Ilustración 9; Diagrama de flujo del cálculo de subsidios.....	69
Ilustración 10: Diagrama del flujo de la elección de los vehículos a retirar	70
Ilustración 11: Diagrama de flujo de la optimización de los vehículos a incorporar	71
Ilustración 12: Total Cost of Ownership	73
Ilustración 13: Objetivos de Desarrollo Sostenible	160
Ilustración 14: Instalador del programa ejecutable.....	198
Ilustración 15: Instalación del programa ejecutable	199
Ilustración 16: Acceso directo del programa ejecutable.....	199
Ilustración 17: Ventana de comandos de la herramienta.....	202
Ilustración 18: Ficheros Excel de resultados	204
Ilustración 19: Hojas del fichero Excel “Fleet-Electrification-Results”	204
Ilustración 20: Hojas del fichero Excel “Fleet-Electrification-Economic-Results”	205
Ilustración 21: Instalador del programa ejecutable.....	206
Ilustración 22: Instalación del programa ejecutable	207
Ilustración 23: Acceso directo del programa ejecutable.....	207
Ilustración 24: Ventana de comandos de la herramienta.....	210
Ilustración 25: Ficheros Excel de resultados	212
Ilustración 26: Hojas del fichero Excel “Fleet.-Electrification-Results”	212
Ilustración 27: Hojas del fichero Excel “Fleet-Electrification-Economic-Results”	213

Tabla de contenido

Figuras

Figura 1: Emisiones de gases de efecto invernadero por país	36
Figura 2: Emisiones de gases de efecto invernadero por sector	36
Figura 3: Emisiones de gases de efecto invernadero en España por sector.....	37
Figura 4: Cost of Ownership de un vehículo VW Golf en diversas tecnologías.....	40
Figura 5: Venta global de vehículos de distintas tecnologías.....	41
Figura 6: Evolución del precio de las baterías de litio	43
Figura 7: Relación entre las hospitalizaciones y los niveles de contaminación	48
Figura 8: Congestión del tráfico en la ciudad de Madrid	53
Figura 9: Tipología y MMA de los vehículos que realizan carga y descarga	58
Figura 10: Número de operaciones diarias y ocupación de los vehículos de transporte	58
Figura 11: Tipo de receptor de las operaciones de carga y descarga	59
Figura 12: Distribución horaria del estacionamiento en carga y descarga.....	59
Figura 13: Lugar de estacionamiento de los vehículos de carga y descarga	60
Figura 14: Zonas reservadas para carga y descarga	60
Figura 15: Evolución del precio de las baterías de litio	74
Figura 16: Evolución del precio de los vehículos eléctricos	75
Figura 17: Diagrama de dispersión del proceso de optimización.....	83
Figura 18: Simulación 1: Gráfico de dispersión de las distintas soluciones	96
Figura 19: Simulación 2: Gráfico de dispersión de las distintas soluciones	103
Figura 20: Simulación 3: Gráfico de dispersión de las distintas soluciones	109
Figura 21: Simulación 4: Gráfico de dispersión de las distintas soluciones	115
Figura 22: Simulación 5: Gráfico de dispersión de las distintas soluciones	122
Figura 23: Simulación 6: Gráfico de dispersión de las distintas soluciones	127
Figura 24: Simulación 7: Gráfico de dispersión de las distintas soluciones	133
Figura 25: Simulación Replicabilidad: Gráfico de dispersión de las soluciones	144
Figura 26: Simulación Escalabilidad: Gráfico de dispersión de las soluciones	153
Figura 27: Congestión del tráfico en la ciudad de Madrid	163
Figura 28: Relación entre las hospitalizaciones y los niveles de contaminación	164
Figura 29: Gráfico de dispersión de las soluciones del estudio.....	203
Figura 30: Gráfico de dispersión de las soluciones del estudio.....	211

Resumen del proyecto

ESTRATEGIA DE ELECTRIFICACION PARA UNA FLOTA DE VEHICULOS DE TRANSPORTE DE DINERO EN EFECTIVO

Autor: Laguna Núñez, Javier.

Director: Díaz Casado, Andrés Diego.

Director: Castañeda Arronte, José Manuel.

Director: Frías Marín, Pablo.

Entidad Colaboradora: Loomis

Introducción

El cambio climático es una de las principales preocupaciones de nuestra sociedad en la actualidad. Los niveles de partículas contaminantes en la atmósfera se están incrementando debido a la actividad humana. A causa de la emisión de partículas como CO₂ y NO_x, el mundo se ha visto envuelto en un periodo de cambio climático con temperaturas cada vez más extremas, deshielo de los glaciares y subida del nivel del mar.

Ante esta realidad, los gobernantes de los países han decidido establecer limitaciones u objetivos de reducción de emisiones a las industrias, empresas o sociedades. Estas medidas se están recogidas en tratados internacionales como el de Kioto y el de París, fijándose objetivos de reducción para los próximos años. Uno de los sectores más afectado por estas medidas es el sector del transporte, siendo responsable del 16,2% de las emisiones anuales y, en el caso de España, siendo el sector que más partículas contaminantes emite.

Estas medidas para la reducción de emisiones en el sector afectan a la sociedad y a las empresas. Por un lado, la población se ve afectada por diversas medidas como, por ejemplo, debido a la restricción de la entrada de vehículos contaminantes a los núcleos urbanos de las principales capitales del mundo. En estas áreas es donde se produce la mayor concentración de vehículos y, por tanto, es la mayor zona de emisiones. Por otro lado, las empresas de transporte se ven afectadas al tener que cumplir un objetivo de reducción de emisiones en su flota de vehículos. Además de las multas a las que se pueden enfrentar por no cumplir estos objetivos, en la actualidad se pueden perder contratos con clientes si la empresa no está comprometida con la sostenibilidad.

En el caso del sector del transporte, estas medidas para reducir la emisión de partículas contaminantes vienen acompañadas de ayudas e incentivos para el uso de vehículos menos contaminantes como pueden ser las tecnologías de vehículos eléctricos, híbridos o de hidrógeno. Estas tecnologías están desarrollándose a una gran velocidad, pero todavía no han alcanzado su nivel de madurez y se enfrentan a distintos retos como pueden ser la autonomía, el peso, el precio o la infraestructura de carga.

Motivación

La posibilidad de realizar este trabajo fin de máster surgió junto con la oportunidad de realizar prácticas internacionales en Loomis, donde me incorporé al departamento de compras e infraestructura de la región europea. Esta empresa sueca se dedica principalmente al transporte de fondos y gestión del efectivo. La motivación de este trabajo se divide en tres partes fundamentales: profesional, personal, y medioambiental.

En primer lugar, la empresa está muy interesada en adaptar la flota de vehículos actuales a vehículos con bajas emisiones. La principal motivación a nivel profesional es poder dotar a la compañía de una estrategia u hoja de ruta para la transición de sus vehículos actuales a vehículos de bajas emisiones. En este trabajo se buscará la forma más económica y rentable para cumplir los objetivos medioambientales de la Unión Europea y de la propia compañía.

Como motivación personal, es un gran desafío este trabajo debido a las características de la empresa y el sector. Los furgones blindados tienen unas dimensiones y características de protección balística que les restringe en numerosos aspectos. Con vehículos de más de 7 toneladas y de 3,5 metros de distancia entre ejes, es muy difícil encontrar vehículos eléctricos en el mercado con una capacidad suficiente para realizar los recorridos que los furgones realizan diariamente. Es un escenario de gran incertidumbre puesto que la tecnología se está desarrollando y no se sabe cómo evolucionarán distintos parámetros en el futuro, siendo difícil construir una estrategia. Por tanto, es un reto poder ayudar a Loomis en la estrategia de reemplazo de vehículos convencionales a otros de bajas emisiones.

Por último, la motivación principal como ingeniero y persona que vive en sociedad es el gran potencial de reducción de sustancias contaminantes que se emiten a la atmósfera. La motivación de este proyecto es que lo pueda utilizar cualquier empresa u organización que tenga como fin reducir las emisiones, lo que conllevará a un mundo más limpio y sano para todos nosotros.

Definición del proyecto

Debido a la urgencia de este cambio en las flotas y la etapa en la que se encuentran las nuevas tecnologías, las empresas de transporte se ven envueltas en una situación de incertidumbre a la que deberán enfrentarse en los próximos años. Algunas de las preguntas que se hacen las empresas son las siguientes:

- ¿Cuáles son los objetivos de reducción que tengo que cumplir?
- ¿Cuál tiene que ser mi tasa anual de reemplazo de vehículos para cumplir los objetivos?
- ¿Cómo va a evolucionar el precio y “cost of ownership” de los distintos vehículos?
- ¿Cómo van a evolucionar las ayudas e incentivos para la adquisición de nuevos vehículos?

- ¿Cuál es la forma óptima de reemplazo de vehículos para conseguir esta reducción?
- ¿Qué inversión he de hacer para conseguir esta reducción de emisiones?

Con este trabajo se pretende responder a las anteriores preguntas para ayudar a las empresas a optimizar la electrificación de su flota optimizando el proceso de tal forma que tenga la menor inversión posible y cumplir con el objetivo de reducciones marcado por la empresa. Para ello, además de desarrollar la metodología correspondiente, se ha creado una herramienta para poder realizar casos de estudio. A través de simulaciones, el usuario que maneje la herramienta podrá observar cómo debe de gestionar su flota cada año, que vehículos retirar y cuales incorporar. Además, podrá ver la reducción total de emisiones y el “cost of ownership” de cada vehículo, cada año y en todo el estudio.

Un valor fundamental de este proyecto es la escalabilidad y replicabilidad del mismo. La sostenibilidad es un objetivo común que incumbe a todos los países, empresas y personas del mundo. Es por ello, que la herramienta de simulación se ha diseñado de forma que permita a cualquier empresa, en cualquier país y con distintas peculiaridades hacer uso de ella sin que se vea mermada su capacidad.

Los objetivos de este proyecto pueden ser resumidos en los siguientes cuatro puntos:

1. Optimizar el reemplazo y la transición de flotas

Con la herramienta se pretende ayudar a las empresas a renovar su flota de vehículos y proporcionarles una transición lo más económica y rentable posible.

2. Cumplir con los objetivos medioambientales

A través de la herramienta, proponer una solución eficaz para cumplir con los objetivos de reducción de emisiones propuestos por la Unión Europea o las propias compañías.

3. Replicabilidad

Crear una herramienta capaz de ser usada por cualquier compañía y que se adapte a cualquier tipo de flota de vehículos.

4. Actualizable

Crear una herramienta que se pueda adaptar a futuros cambios en el tipo de tecnología, precios, etc. Es necesario que sea una herramienta que no se quede obsoleta y pueda ser actualizada fácilmente ya que, al ser una estrategia futura, hay muchos elementos que pueden variar.

Descripción de la herramienta

La herramienta se ha programado utilizando el lenguaje M, mediante el software informático de Matlab. Debido a que no todos los usuarios de la herramienta están familiarizados con este software, se ha desarrollado una interfaz para facilitar el manejo al usuario.

En primer lugar, el usuario introducirá los datos y parámetros de su flota en un Excel, que serán enviados a la herramienta una vez esta se ejecute. Posteriormente, la herramienta realizará la simulación del estudio y su optimización, proporcionando al usuario información de en qué punto se encuentra la simulación o si ha habido algún problema. Por último, una vez terminada la simulación, el usuario recibirá los resultados de la simulación en un fichero Excel, donde podrá analizarlos con mayor facilidad. Mediante este procedimiento, se pretende facilitar al usuario la utilización de la herramienta, con el fin de poder ser utilizada por casi cualquier trabajador de la empresa que desee hacer uso de este.

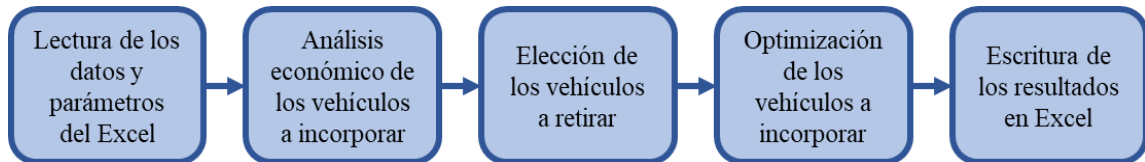


Ilustración 1: Diagrama de cajas de la metodología

Cuando se ejecuta la herramienta, el programa lee los datos del Excel que previamente ha introducido el usuario. Este Excel se compone de las siguientes 4 pestañas:

1. **Current Fleet Information:** en esta pestaña el usuario debe introducir los datos de los vehículos que componen la flota en la actualidad. Para ello deberá categorizarlos según su tamaño y tipo de ruta e introducir distintos datos relevantes como año de matriculación, kilómetros acumulados, consumo, etc.
2. **Market Vehicles Information:** esta pestaña contendrá los vehículos disponibles en el mercado incluyendo su tamaño y tipo de ruta y distintos costes para el análisis económico.
3. **Parameters:** en esta pestaña se recoge distinta información acerca de la empresa y del estudio: tasa de reemplazo, años del estudio, precios de combustibles y la reducción de emisiones deseada.
4. **Reports:** esta última pestaña da la opción al usuario de generar diferentes informes con el fin de obtener al final de la simulación los resultados que le puedan ser útiles para su posterior análisis y toma de decisiones.

Una vez la simulación ha leído los datos proporcionados en el Excel por el usuario, se procede a realizar el análisis económico de los vehículos que son candidatos para incorporarse a la flota. El análisis está fundamentado en un flujo de caja donde se compara el NPV (Net Present Value) de cada vehículo del mercado según los años de amortización indicados por el usuario. Además, para realizar un análisis más realista, se tiene en cuenta la evolución del precio en los vehículos eléctricos y el descenso de ayudas e incentivos a lo largo de los años. Para este proceso se necesitan los siguientes datos.

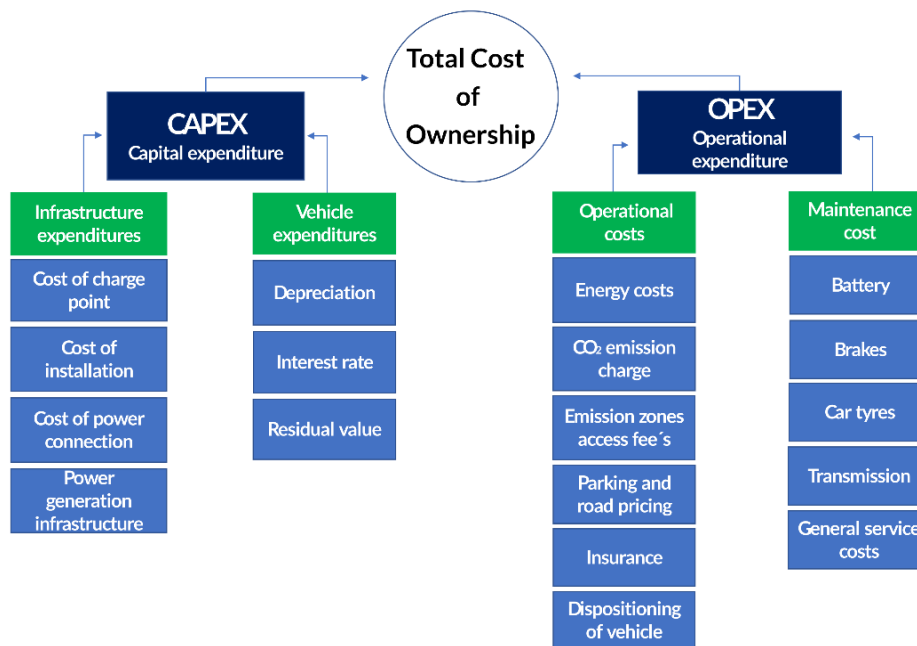


Ilustración 2: Total Cost of Ownership

Por otro lado, la herramienta realiza una proyección a lo largo de los años del estudio de los vehículos de la flota actual (años y kilómetros) para decidir qué vehículos hay que retirar de la flota cada año, según la tasa de reemplazo anual marcada por el usuario. Una vez finalizado, la herramienta identifica que vehículos de los que hay en el mercado son aptos para incorporarse a la flota en sustitución del vehículo que se ha dado de baja.

Adentrándose en el punto crítico de la simulación, la herramienta realiza una optimización del reemplazo de los vehículos que se han de incorporar basado en el multiplicador de Lagrange. En este problema, se desea minimizar el NPV total del estudio teniendo en cuenta que la reducción de emisiones al final del estudio debe de ser superior o igual a lo marcado por el usuario. La herramienta consigue esto minimizando el NPV total del estudio incluyendo un precio sombra para las emisiones que generan cada vehículo.

El precio sombra es el coste de oportunidad de un bien o servicio, siendo utilizado en problemas de programación lineal. El precio sombra se define como el valor de una unidad extra del recurso (emisiones) que no es incluido en los cálculos de los coeficientes de la función objetivo (NPV). Por tanto, la herramienta maneja dos soluciones: la solución real de la simulación y la solución dual teniendo en cuenta el precio de las emisiones (solución de precios de sombra). A través de iteraciones, la herramienta es capaz de converger un precio sombra de emisiones que consiga una solución con la reducción de emisiones deseada y el NPV mínimo. Esta solución consistirá en los vehículos que se han de incorporar cada año, en sustitución a los vehículos retirados, para optimizar la electrificación de la flota de la empresa.

Una vez finalizado el estudio, la herramienta escribirá los informes que ha seleccionado el usuario en un Excel para su posterior análisis por parte de la empresa. Estos informes disponibles son los siguientes:

- Informe detallado del NPV de cada vehículo, año y estudio.

- Informe detallado de las partículas emitidas cada año y en total del estudio, así como la reducción total de emisiones.
- Informe de la variación de identificadores de los vehículos de la flota a lo largo del estudio.
- Informe de la variación de la edad de los vehículos de la flota a lo largo del estudio.
- Informe de la variación de kilómetros de los vehículos de la flota a lo largo del estudio.
- Informe de la variación de emisiones de los vehículos de la flota a lo largo del estudio.
- Análisis económico detallado de los vehículos que se introducen en la flota en cada año del estudio.
- NPV de los vehículos del mercado.

Resultados

En este apartado se va a estudiar la estrategia del cambio de flota de vehículos de transporte de dinero en efectivo con el fin de establecer una hoja de ruta cuando la tecnología esté disponible. Loomis es una compañía sueca cuya actividad principal es el transporte de dinero en efectivo y la gestión de efectivo. Esta empresa realiza un gran número de rutas diarias por lo que electrificar la flota de vehículos reduciría la mayor parte de sus emisiones. Este sector es peculiar y conlleva una gran cantidad de medidas de seguridad ya que es necesario que el vehículo tenga un blindaje especial según cada país. En el caso de España, este blindaje viene especificado en el BOE. Esto añade un gran peso al vehículo, además del peso de la carga que debe tener disponible para la carga de grandes cantidades de billete y moneda. El proyecto se centra en la base de la empresa en Madrid, España, donde se estudiará la sustitución de los vehículos convencionales por vehículos limpios y los beneficios que puede tener tanto para la empresa, garantizando la viabilidad económica, como para la sociedad y el entorno.

El caso base tiene una tasa de reemplazo del 10% y un objetivo de reducción de emisiones del 50% a conseguir en 9 años de estudio. Por tanto, durante la simulación se tendrán que retirar e incorporar 6 vehículos al año, es decir, un total de 54 automóviles a lo largo del estudio. Los detalles de los resultados se pueden observar dentro del apartado donde se analizan detalladamente. La solución óptima del estudio cuenta con un 54,12% de reducción de emisiones en 9 años donde la empresa tiene que gastar un NPV total de 4.825.394,43 €.

El resto de simulaciones del capítulo pretenden recrear distintos escenarios que pueden ocurrir en un futuro próximo. En cada una de ellas se varía un parámetro para analizar cómo afecta en la simulación y en la solución óptima del estudio. Las simulaciones realizadas han sido las siguientes:

2. Disminución de la reducción de emisiones del 50% al 30%: en este escenario la empresa tiene que alcanzar una reducción menor de emisiones en el mismo tiempo, por lo que necesitará emplear menos dinero para conseguir el objetivo. La solución óptima tiene un NPV total de 4.822.678,74 € obteniendo un 47,52% de reducción de emisiones.

3. Subida del precio del diésel un 40%: al haber aumentado el precio del combustible, se incorporarán más vehículos eléctricos que son más caros que los automóviles diésel pero producen menos emisiones de CO₂. Por tanto, la solución obtenida tiene un NPV total mayor que el caso base (4.963.819,26 €) con una reducción muy alta de emisiones del 77,21%.
4. La duración del estudio se reduce de 9 años a 6 años: al reducirse el tiempo disponible para reducir el 50% de las emisiones, la empresa deberá gastar más dinero proporcionalmente en los 6 años aunque el NPV total sea menor al reemplazar solo 6x6=36 vehículos. La solución óptima tiene una reducción total de emisiones del 53,38% y un NPV total de 3.292.747,76 €.
5. Subida del precio de la electricidad un 67%: al aumentar el precio de la electricidad, habrá que emplear más dinero en los vehículos eléctricos que se incorporen. Por ello, la solución óptima tiene la misma combinación de vehículos nuevos obteniendo la misma reducción de emisiones (54,12%) pero con un NPV total de 4.947.704,88 €, mayor que el caso base.
6. Reducción de la tasa de reemplazo del 5% al 10%: en este escenario la empresa solo retira 3 vehículos de la flota cada año, por lo que solo recambia 27 vehículos a lo largo del estudio, siendo imposible llegar a un 50% de reducción de emisiones. Por ello, la herramienta aumenta la tasa de reemplazo al 6,66% (4 vehículos) para obtener una solución que cumpla con los objetivos de emisiones. El NPV total es de 3.220.142,33 € y una reducción total de emisiones del 51,73%.
7. Retiro de los subsidios por parte del estado: al retirar los subsidios, el NPV de los vehículos eléctricos aumentarán, haciendo que el NPV total de la simulación aumente. La solución óptima tiene la misma combinación de vehículos incorporados a la flota por lo que tiene la misma reducción de emisiones que el caso base (54,12%) pero un NPV ligeramente mayor de 4.826.088,15 €.

Tabla 1: Resumen de las simulaciones del caso de estudio de Loomis

Nº Simulación	Estudio	Reducción de Emisiones	NPV Total
1	Caso Base	54,12%	4.825.394,43 €
2	Reducción de Emisiones al 30%	47,52%	4.822.678,74 €
3	Subida de precio del diesel del 40%	77,21%	4.963.819,26 €
4	Duración del estudio reducida a 6 años	53,38%	3.292.747,76 €
5	Subida de precio de la electricidad del 67%	54,12%	4.947.704,88 €
6	Reducción de la tasa de reemplazo al 5%	51,73%	3.220.142,33 €
7	Retiro de los subsidios	54,12%	4.826.088,15 €

Por otro lado, se han realizado dos casos de estudio para analizar la replicabilidad y la escalabilidad de la herramienta. Para ejemplificar la flexibilidad de la herramienta para la adaptación a distintos tipos de compañías, flotas y países, se ha realizado una simulación. Este estudio se realiza para una empresa de reparto de comida a domicilio en la ciudad brasileña de Río de Janeiro. La flota de la empresa se compone de 30 vehículos entre motocicletas y turismos, los cuales realizan 5 rutas diferentes por la ciudad. Tras realizar la simulación, los resultados que se obtienen son que la empresa debe de gastar un NPV total de 540.669,56 € para lograr la reducción de emisiones del 30% que les impone el gobierno de la ciudad para 2033.

Para estudiar la escalabilidad de la herramienta, se ha propuesto un caso de estudio. En él, se analiza la flota de Madrid y de Estocolmo de Loomis. Las dos flotas son totalmente distintas entre sí pero que forman parte de la misma compañía, compartiendo objetivos de reducción de emisiones. A través de este estudio se pretende demostrar que la herramienta puede ser utilizada por empresas más o menos grandes y por multinacionales operando en varios países. Tras realizar la simulación, los resultados que se obtienen son que la empresa debe de gastar un NPV total de 7.812.339,06 € para lograr la reducción de emisiones del 50% que les impone el gobierno de la ciudad para 2030.

Conclusiones

La contaminación medioambiental a la que hacemos frente en la actualidad es uno de los mayores problemas que tiene el mundo actualmente. Los acuerdos internacionales intentan tomar medidas para abordar este problema lo antes posible. El objetivo del 2030, según el acuerdo de París, obliga a las empresas a reducir sus emisiones de CO₂ un 55% respecto a las que generaban en 1990.

Uno de los sectores que más emisiones produce es el transporte, causante del 16,2% de ellas por lo que gran parte de las medidas y restricciones van dirigidas a este sector. Debido a la urgencia de este cambio en las flotas y la etapa en la que se encuentran las nuevas tecnologías, las empresas de transporte se ven envueltas en una situación de incertidumbre a la que deberán enfrentarse en los próximos años. La finalidad de este trabajo es la elaboración de una herramienta para cuantificar económica y energéticamente y optimizar el camino a la electrificación de la flota de vehículos de una empresa para cumplir con los objetivos de reducción de emisiones marcados por el gobierno o la propia empresa.

La metodología del proyecto se basa en tres áreas: análisis económico de los vehículos del mercado, elección de los vehículos a retirar de la flota y optimización de los vehículos a incorporar.

El análisis económico de los vehículos del mercado se realiza basado en un flujo de caja, calculando el “cost of ownership” de cada vehículo que será candidato a incorporarse a la flota.

La elección de renovación de la flota se realiza de diferente forma según sea un vehículo en alquiler o en propiedad. Para el primero, la decisión de que un vehículo alquilado sea reemplazado es que su contrato de alquiler haya concluido. Para los vehículos en propiedad, se halla un coeficiente en base a su edad y kilómetros acumulados. Según la tasa de reemplazo introducida por el usuario, se elegirán para retirar el número de vehículos con mayor coeficiente.

Por último, una vez se sabe qué vehículos se han de retirar y cuáles son las características de los vehículos en el mercado, se procede a la optimización. El objetivo es minimizar el valor absoluto del NPV total del estudio siempre y cuando la reducción de emisiones al final del estudio sea mayor que la requerida por el usuario.

Para que este proyecto sea práctico para distintas empresas se ha desarrollado una herramienta para realizar simulaciones. A través del programa informático Matlab, se ha escrito un código en lenguaje M para realizar casos de estudio. Con el fin de facilitar el trabajo al usuario, los datos necesarios serán introducidos completando un Excel. Una vez el programa termine la simulación, los resultados serán escritos en otro fichero Excel para su posterior análisis. Para finalizar, se ha creado un ejecutable que permite utilizar la herramienta sin necesidad de tener instalado Matlab, lo que permite su uso sin necesidad de tener instalada la licencia del programa.

Para mostrar y entender el funcionamiento de la herramienta se han realizado hasta 7 simulaciones para analizar cómo debería de ser reemplazada la flota de vehículos de Loomis. La empresa es una compañía sueca distribuida por todo el mundo que se dedica al transporte del dinero en efectivo. La flota elegida pertenece a la base de Madrid y consta de 60 vehículos con diferentes configuraciones de tamaño y tipo de ruta asignado.

El caso base tiene una tasa de reemplazo del 10% y un objetivo de reducción de emisiones del 50% a conseguir en 9 años de estudio. Por tanto, durante la simulación se tendrán que retirar e incorporar 6 vehículos al año, es decir, un total de 54 automóviles a lo largo del estudio. Los detalles de los resultados se pueden observar dentro del apartado donde se analizan detalladamente. La solución óptima del estudio cuenta con un 54,12% de reducción de emisiones en 9 años donde la empresa tiene que gastar un NPV total de 4.825.394,43 €.

El resto de simulaciones permiten un análisis de sensibilidad ante distintas modificaciones del escenario base. En cada una de ellas se varía un parámetro para analizar cómo afecta en la simulación y en la solución óptima del estudio. Las simulaciones realizadas han sido las siguientes:

Tabla 2: Resumen de las simulaciones realizadas en el proyecto

Nº Simulación	Estudio	Reducción de Emisiones	NPV Total
1	Caso Base	54,12%	4.825.394,43 €
2	Reducción de Emisiones al 30%	47,52%	4.822.678,74 €
3	Subida de precio del diesel del 40%	77,21%	4.963.819,26 €
4	Duración del estudio reducida a 6 años	53,38%	3.292.747,76 €
5	Subida de precio de la electricidad del 67%	54,12%	4.947.704,88 €
6	Reducción de la tasa de reemplazo al 5%	51,73%	3.220.142,33 €
7	Retiro de los subsidios	54,12%	4.826.088,15 €

El alcance del uso de la herramienta es global, ya que el problema y el usuario también lo son. Debido a esto, dos de los aspectos fundamentales del proyecto son la replicabilidad y escalabilidad. Estas cualidades confieren a la herramienta de una universalidad necesaria para conseguir lograr el fin del trabajo.

En primer lugar, la replicabilidad del proyecto permite que cualquier empresa pueda hacer uso de la herramienta dando igual en qué sector se encuentre, cómo sea su flota de vehículos o desde que país opera. La herramienta consta de la flexibilidad suficiente para que la empresa pueda categorizar su flota según le convenga y parametrizar el estudio con toda la información de la compañía y su entorno.

Por otro lado, la escalabilidad también está presente dentro el proyecto. Este aspecto es fundamental en el software puesto que permite trabajar con distintos volúmenes de flotas o incluso con flotas distintas a la vez si es el caso de una empresa multinacional. El objetivo es no perder cualidades de la herramienta sea el tipo de flota que sea.

Abstract

ELECTRIFICATION STRATEGY FOR A CASH-IN-TRANSIT VEHICLE FLEET

Author: Laguna Núñez, Javier.

Supervisor: Díaz Casado, Andrés Diego.

Supervisor: Castañeda Arronte, José Manuel.

Supervisor: Frías Marín, Pablo.

Collaborating Entity: Loomis

Introduction

Climate change is one of the main concerns of our society today. Levels of particulate pollutants in the atmosphere are increasing due to human activity. Due to the emission of particles such as CO₂ and NO_x, the world has been involved in a period of climate change with increasingly extreme temperatures, melting glaciers and rising sea levels.

Faced with this reality, the leaders of the countries have decided to establish limitations or emission reduction targets for industries, companies or societies. These measures are being laid down in international treaties such as Kyoto and Paris, setting reduction targets for the coming years. One of the sectors most affected by these measures is the transport sector, which is responsible for 16.2% of annual emissions and, in the case of Spain, is the sector that emits the most polluting particles.

These measures to reduce emissions in the sector affect society and businesses. On the one hand, the population is affected by various measures, such as, for example, restricting the entry of polluting vehicles into the city centers of the world's main capitals. This is where the highest concentration of vehicles occurs and is therefore considered to be the largest emission area. On the other hand, transport companies are affected by having to meet an emission reduction target in their vehicle fleet. In addition to the fines, they may face for failing to meet these goals, customer contracts can now be lost if the company is not committed to sustainability.

These measures to reduce the emission of particulate pollutants in the transport sector are accompanied by aid and incentives for the use of less polluting vehicles such as electric, hybrid or hydrogen vehicle technologies. These technologies are developing at a great speed, but they have not yet reached their level of maturity and face different challenges such as range, weight, price or charging infrastructure.

Motivation

The possibility to do this Master's thesis came along with the opportunity to do an international internship at Loomis, where I joined the procurement and infrastructure department of the European region. This Swedish company is mainly involved in cash in transit and cash management. The motivation for this project is divided into three main parts: professional, personal and environmental.

First, the company is very interested in adapting the current vehicle fleet to low-emission vehicles. The main motivation at the professional level is to be able to provide the

company with a strategy or roadmap for the transition of its current vehicles to low-emission vehicles. This work will look for the most economical and cost-effective way to meet the environmental objectives of the European Union and the company itself.

As a personal motivation, this work is a great challenge owing the characteristics of the company and the sector. Armored vans have ballistic protection dimensions and characteristics that restrict them in many respects. With vehicles of more than 7 tons and 3.5 meters of wheelbase, it is very difficult to find electric vehicles on the market with sufficient capacity to make the routes that the trucks cover on a daily basis. It is a scenario of big uncertainty since the technology is developing and it is not known how different parameters will evolve in the future, being difficult to build a strategy. It is therefore a challenge to be able to assist Loomis in the strategy of replacing conventional vehicles with low-emission vehicles.

Finally, the main motivation as an engineer and a person living in society is the great potential for reducing polluting substances that are emitted into the atmosphere. The motivation for this project is that it can be used by any company or organization aiming to reduce emissions, which will lead to a cleaner and healthier world for all of us.

Project definition

Due to the urgency of this change in fleets and the stage in which new technologies are at, transport companies find themselves in a situation of uncertainty that they will have to face in the coming years. Some of the questions that companies ask themselves are the following:

- What are the reduction targets I have to meet?
- What does my annual vehicle replacement rate have to be to achieve the goals?
- How will the price and "cost of ownership" of the different vehicles evolve?
- How will subsidies and incentives for the purchase of new vehicles evolve?
- What is the optimal way of vehicle replacement to achieve this reduction?
- What investment do I have to make to achieve this emissions reduction?

This project aims to answer the above questions to help companies optimize the electrification of their fleet by optimizing the process in such a way that it has the least possible investment and meet the reduction target set by the company. Through simulations, the user who handles the tool will be able to observe how to manage their fleet each year, which vehicles to remove and which to incorporate. In addition, they will be able to see the total reduction of emissions and the "cost of ownership" of each vehicle, year and the study.

A fundamental value of this project is its scalability and replicability. Sustainability is a common goal that concerns all countries, companies and people in the world. For this reason, the simulation tool has been designed in such a way that it allows any company, in any country and with different peculiarities to make use of it without reducing its capacity.

The goals of this project can be summarized in the following four points:

1. Optimize fleet replacement and transition

The tool is intended to help companies renew their fleet of vehicles and provide them with the most economical and cost-effective transition possible.

2. Achieve environmental targets

Through the tool, propose an effective solution to meet the emission reduction targets proposed by the European Union or the companies themselves.

3. Replicability

Create a tool capable of being used by any company and adaptable to any type of vehicle fleet.

4. Updatable

Create a tool that can be adapted to future changes in the type of technology, prices, etc. It is necessary the tool does not become obsolete and can be easily updated since, being a future strategy, there are many elements that can vary.

Description of the tool

This tool has been programmed using the M language, using Matlab computer software. Since not all users of the tool are familiar with this software, an interface has been developed to make it easier for the user to handle.

First, the user will enter the data and parameters of their fleet in an Excel file, which will be sent to the tool once it is executed. Subsequently, the tool will carry out the simulation of the study and its optimization, providing the user with information on where the simulation is or if there has been any problem. Finally, once the simulation has finished, the user will receive the results of the simulation in an Excel file, where they can analyze them easily. Through this procedure, it is intended to facilitate the user's use of the tool, in order to be used by almost any worker of the company who wishes to make use of it.

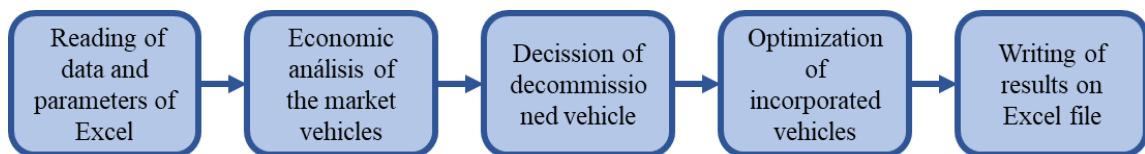


Ilustración 3: Diagrama de caja de la metodología - Inglés

When the tool is run, the program reads the excel data previously entered by the user. This Excel consists of the following 4 tabs:

1. Current Fleet Information: in this tab, the user must enter the data of the vehicles that currently make up the fleet. To do this, the user must categorize them according to their size and type of route, and enter different relevant data such as year of registration, accumulated kilometers, consumption, etc.
2. Market Vehicles Information: this tab will contain the vehicles available in the market including their size and type of route and different costs for the economic analysis.

3. Parameters: this tab contains different information about the company and the study: replacement rate, years of the study, fuel prices and the desired emission reduction.
4. Reports: this last tab gives the user the option to generate different reports in order to obtain, at the end of the simulation, the results that may be useful for their subsequent analysis and decision-making.

Once the simulation has read the data provided in the Excel by the user, it proceeds to carry out the economic analysis of the vehicles that are candidates to join the fleet. The analysis is based on a cash flow where the NPV (Net Present Value) of each vehicle on the market is compared according to the years of depreciation indicated by the user. In addition, to make a more realistic analysis, the price evolution in electric vehicles and the decrease in subsidies and incentives over the years are taken into account. The following data is required for this process:

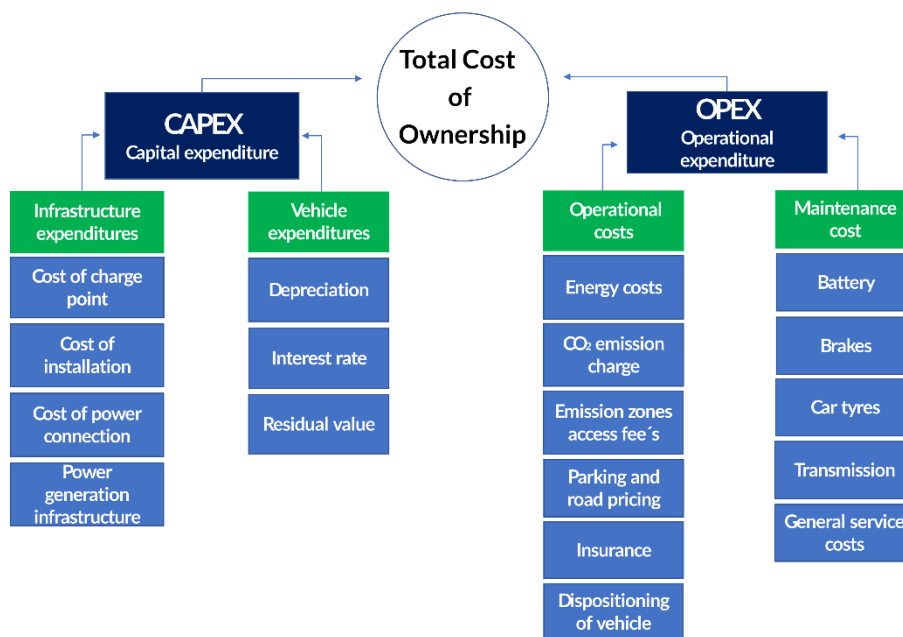


Ilustración 4: Total Cost of Ownership - Inglés

On the other hand, the tool makes a projection over the years of the study of the vehicles of the current fleet (years and kilometers) to decide which vehicles should be removed from the fleet each year, according to the annual replacement rate set by the user. Once completed, the tool identifies which vehicles on the market are suitable to be incorporated into the fleet to replace the decommissioned vehicle.

Moving on to the critical point of the simulation, the tool performs an optimization of the replacement of the vehicles to be incorporated based on Lagrange multiplier. In this problem, it is desired to minimize the total NPV of the study taking into account that the emission reduction at the end of the study must be greater than or equal to what is marked by the user. The tool achieves this by minimizing the total NPV of the study by including a shadow price for the emissions generated by each vehicle.

The shadow price is the opportunity cost of a good or service, being used in linear programming problems. The shadow price is defined as the value of an extra unit of the resource (emissions) that is not included in the calculations of the objective function coefficients (NPV). Therefore, the tool handles two solutions: the real solution of the

simulation and the dual solution taking into account the price of the emissions (shadow price solution). Through iterations, the tool is able to converge a shadow price of emissions that achieves a solution with the desired emission reduction and the minimum NPV. This solution will consist of the vehicles that have to be incorporated each year, replacing the retired vehicles, to optimize the electrification of the company's fleet.

Once the study is finished, the tool will write the reports selected by the user into an Excel file for further analysis by the company. These available reports are as follows:

- Detailed NPV report of each vehicle, year and study.
- Detailed report of the particles emitted each year and in total of the study, as well as the total emission reduction.
- Report of the variation of vehicle identifiers in the fleet throughout the study.
- Report of the variation in the age of the vehicles in the fleet throughout the study.
- Report of the variation of kilometers of the vehicles in the fleet throughout the study.
- Report of the variation of emissions of the vehicles in the fleet throughout the study.
- Detailed economic analysis of the vehicles that are introduced into the fleet in each year of the study.
- Market vehicles NPV.

Results

This section will study the strategy for changing the fleet of cash-in-transit vehicles in order to establish a roadmap when the technology becomes available. Loomis is a Swedish company whose core business is cash transport and cash management. This company runs a large number of daily routes so electrifying the vehicle fleet would reduce most of its emissions. This sector is peculiar and involves a large number of security measures because it is necessary for the vehicle to have a special armor depending on each country. In the case of Spain, this armoring is specified in the BOE (Boletín Oficial del Estado). This adds a great deal of weight to the vehicle, in addition to the weight of the cargo that must be available for the loading of large amounts of banknotes and coins. The project focuses on the company's branch in Madrid, Spain, where the replacement of conventional vehicles with clean vehicles will be studied and the benefits it can have both for the company, ensuring economic viability, and for society and the environment.

The base case has a replacement rate of 10% and an emissions reduction target of 50% to be achieved in 9 years of study. Therefore, during the simulation, 6 vehicles per year will have to be retired and incorporated, i.e. a total of 54 cars over the course of the study. The details of the results can be seen in the section where they are analyzed in detail. The optimal solution of the study has a 54.12% reduction of emissions in 9 years where the company has to spend a total NPV of 4.825.394,43 €.

The rest of the simulations in the chapter aim to recreate different scenarios that may occur in the near future. In each of them a parameter is varied to analyze how it affects the simulation and the optimal solution of the study. The simulations carried out are as follows:

2. Decrease in emission reduction from 50% to 30%: in this scenario the company has to achieve a lower emission reduction in the same time, so it will need to use less money to achieve the goal. The optimal solution has a total NPV of 4.822.678,74 € obtaining a 47.52% reduction of emissions.

3. Diesel price increase by 40%: as the price of fuel has increased, more electric vehicles will be incorporated, which are more expensive than diesel cars but produce less CO₂ emissions. Therefore, the solution obtained has a higher total NPV than the base case (4,963,819.26 €) with a very high emissions reduction of 77.21%.

4. The duration of the study is reduced from 9 years to 6 years: by reducing the time available to reduce 50% of the emissions, the company will have to spend proportionally more money in the 6 years even though the total NPV is lower by replacing only 6x6=36 vehicles. The optimal solution has a total emissions reduction of 53.38% and a total NPV of 3,292,747.76 €.

5. 67% increase in the price of electricity: as the price of electricity increases, more money will have to be spent on the new electric vehicles. Therefore, the optimal solution has the same mix of new vehicles obtaining the same emissions reduction (54.12%) but with a total NPV of €4,947,704.88, higher than the base case.

6. Reduction of the replacement rate from 5% to 10%: in this scenario the company only removes 3 vehicles from the fleet each year, so it only replaces 27 vehicles throughout the study, making it impossible to achieve a 50% reduction in emissions. Therefore, the tool increases the replacement rate to 6.66% (4 vehicles per year) to obtain a solution that meets the emissions targets. The total NPV is 3,220,142.33 € and a total emissions reduction of 51.73%.

7. Withdrawal of subsidies by the government: by withdrawing subsidies, the NPV of electric vehicles will increase, causing the total NPV of the simulation to increase. The optimal solution has the same mix of vehicles incorporated in the fleet so it has the same emission reduction as the base case (54.12%) but a slightly higher NPV of 4,826,088.15 €.

Tabla 3: Resumen de las simulaciones del caso de estudio de Loomis - Inglés

Simulation Number	Case	Emission Reduction	NPV Total
1	Base Case	54,12%	4.825.394,43 €
2	Emission Reduction to 30%	47,52%	4.822.678,74 €
3	Increase of diesel price a 40%	77,21%	4.963.819,26 €
4	Decrease of simulation years to 6	53,38%	3.292.747,76 €
5	Increase of electricity price a 67%	54,12%	4.947.704,88 €
6	Replacement rate to 5%	51,73%	3.220.142,33 €
7	No Subsidies	54,12%	4.826.088,15 €

On the other hand, two case studies have been carried out to analyze the replicability and scalability of the tool. To exemplify the flexibility of the tool for adaptation to different types of companies, fleets and countries, a simulation has been performed. This study is carried out for a food delivery company in the Brazilian city of Rio de Janeiro. The company's fleet consists of 30 vehicles, including motorcycles and cars, which run 5

different routes around the city. After performing the simulation, the results obtained are that the company must spend a total NPV of 540.669,56 € to achieve the 30% emission reduction imposed by the city government for 2033.

To study the scalability of the tool, a case study has been proposed. In it, Loomis' Madrid and Stockholm fleets are analyzed. The two fleets are totally different from each other but are part of the same company, sharing emission reduction targets. The aim of this study is to demonstrate that the tool can be used by larger or smaller companies and multinationals operating in several countries. After performing the simulation, the results obtained are that the company must spend a total NPV of 7.812.339,06 € to achieve the 50% emission reduction imposed by the European Union for 2030.

Conclusions

The environmental pollution we face today is one of the biggest problems facing the world today. International agreements seek to take action to address this problem as soon as possible. The 2030 target, according to the Paris agreement, obliges companies to reduce their CO2 emissions by 55% compared to what they generated in 1990.

One of the sectors that produces the most emissions is transport, which is responsible for 16.2% of them, so a large part of the measures and restrictions are aimed at this sector. Due to the urgency of this change in the fleets and the stage in which the new technologies are at, transport companies are involved in a situation of uncertainty that they will have to face in the coming years. The purpose of this project is to guide companies on their way to fleet electrification in order to meet the emission reduction targets set by the government or the company itself.

The project methodology is based on three areas: economic analysis of vehicles on the market, choice of vehicles to be removed from the fleet and optimization of vehicles to be incorporated.

The economic analysis of the vehicles on the market is based on a cash flow, calculating the cost of ownership of each vehicle that will be a candidate to be incorporated into the fleet.

The choice of fleet renewal is made differently depending on whether the vehicle is leased or owned. For the first one, the decision to replace a leased vehicle is based on the end of its lease contract. For owned vehicles, a coefficient is calculated based on their age and accumulated kilometers. Depending on the replacement rate entered by the user, the number of vehicles with the highest coefficient will be chosen for retirement.

Finally, once it is known which vehicles are to be retired and what are the characteristics of the vehicles on the market, the optimization proceeds. The objective is to minimize the absolute value of the total NPV of the study as long as the emission reduction at the end of the study is greater than that required by the user.

In order to make this project practical for different companies, a simulation tool has been developed. Through the computer program Matlab, a code has been written in M language to carry out case studies. In order to facilitate the use of the tool by the user, the necessary

data will be entered by filling in an Excel file. Furthermore, once the program finishes the simulation, the results will be written in another Excel file for further analysis by the user. Finally, an executable program has been created to allow the use of the tool without the need of having Matlab installed, which allows its use without the need of having the program license installed.

To show and understand how the tool works, up to 7 simulations have been carried out to analyze how Loomis' vehicle fleet should be replaced. The company is a Swedish company distributed all over the world that is dedicated to the transport of cash. The chosen fleet is based in Madrid and consists of 60 vehicles with different size configurations and route type assigned.

The base case has a replacement rate of 10% and an emissions reduction target of 50% to be achieved in 9 years of study. Therefore, during the simulation, 6 vehicles per year will have to be removed and incorporated, i.e. a total of 54 cars over the course of the study. The details of the results can be seen in the section where they are analyzed in detail. The optimal solution of the study has a 54.12% reduction of emissions in 9 years where the company has to spend a total NPV of 4,825,394.43 €.

The rest of the simulations in the chapter aim to recreate different scenarios that may occur in the near future. In each of them a parameter is varied to analyze how it affects the simulation and the optimal solution of the study. The simulations performed are as follows:

Tabla 4: Resumen de las simulaciones realizadas en el proyecto – Inglés

Nº Simulación	Estudio	Reducción de Emisiones	NPV Total
1	Caso Base	54,12%	4.825.394,43 €
2	Reducción de Emisiones al 30%	47,52%	4.822.678,74 €
3	Subida de precio del diesel del 40%	77,21%	4.963.819,26 €
4	Duración del estudio reducida a 6 años	53,38%	3.292.747,76 €
5	Subida de precio de la electricidad del 67%	54,12%	4.947.704,88 €
6	Reducción de la tasa de reemplazo al 5%	51,73%	3.220.142,33 €
7	Retiro de los subsidios	54,12%	4.826.088,15 €

The scope of the tool is global, since the problem and the user are also global. Because of this, two of the fundamental aspects of the project are replicability and scalability. These qualities give the tool a universality necessary to achieve the purpose of the work.

Firstly, the replicability of the project allows any company to make use of the tool, no matter what sector it is in, what its fleet of vehicles is like or from which country it operates. The tool is flexible enough to allow the company to categorize its fleet as it sees fit and to parameterize the study with all the information about the company and its environment.

On the other hand, scalability is also present in the project. This aspect is fundamental in the software since it allows working with different fleet volumes or even with different fleets at the same time if it is the case of a multinational company. The objective is not to lose the qualities of the tool regardless of the type of fleet.

1 Transporte de última milla

1.1 Introducción

Esta sección del documento aborda la situación actual de diversos aspectos relevantes a lo largo del proyecto. Con este apartado se pretende dotar al lector del entorno que rodea al trabajo, para comprender mejor el por qué es necesario, la importancia que tiene y los beneficios que puede aportar a la sociedad.

1.2 Problema medioambiental

Actualmente, el cambio climático es la preocupación número uno de nuestra sociedad, según una encuesta realizada en 26 países por Pew Research Center en el año 2019 (Poshter & Huang, 2019). Cada vez son más frecuentes noticias relacionadas con temperaturas extremas, fenómenos meteorológicos insólitos, el deshielo de los glaciares, etc. Este cambio climático deriva del calentamiento global producido en gran medida por la cantidad de emisiones que emitimos a la atmósfera, sobre todo de partículas en suspensión (PM). Estas partículas afectan tanto a nuestro planeta como a los seres humanos, alterando la calidad del aire y produciendo graves problemas de salud como por ejemplo enfermedades cardiopulmonares. En un estudio reciente, se ha estimado que las muertes prematuras relacionadas con la contaminación ambiental son aproximadamente 0,8 millones, lo que supone un 1,4% de las totales. Además, como consecuencia de los efectos de la contaminación atmosférica se han perdido 6,4 millones de años vividos, lo que supone un 0,7% respecto al total (Ezzati, D.Lopez, Rodgers, & Murray, 2004).

1.2.1 Regulaciones

Es por ello, que los gobiernos han llegado a acuerdos internacionales como Kioto y París con el fin de mitigar las emisiones de partículas contaminantes. Estos acuerdos pactan la reducción de emisiones a la atmósfera y hacen tomar medidas a los gobiernos nacionales. El Protocolo de Kioto (2008-2020) recogía la limitación de las emisiones de gases de efecto invernadero al 15% de emisiones de un año base y, posteriormente, la reducción de un 20% de los gases de efecto invernadero respecto al año 1990. En 2015, tuvo lugar en la ciudad francesa de París la vigésima primera sesión sobre el cambio climático por las Naciones Unidas, COP21, finalizándose con el Acuerdo de París en el cual se recogen cuatro principales objetivos para el 2030:

- 55% menos de emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con 1990
- 32% de energías renovables en el consumo de energía
- 32,5% de mejora de la eficiencia energética
- Consecución del objetivo de interconexiones de electricidad del 15%

Sin embargo, como se muestra en la siguiente tabla, los acuerdos de Kioto y París no están dando los resultados esperados en algunos países. Mientras que, en España, la Unión Europea o Estados Unidos las emisiones de gases de efecto invernadero han disminuido

Transporte de última milla

desde 1990, países como China o India han aumentado considerablemente sus emisiones, haciendo que se haya aumentado de 34,97 billones de toneladas en 1990 a 49,36 billones de toneladas en 2016, un aumento del 41%. Esto quiere decir que los compromisos de reducción de emisiones son asimétricos, según el nivel de desarrollo de cada país (Ritchie & Roser, 2020).

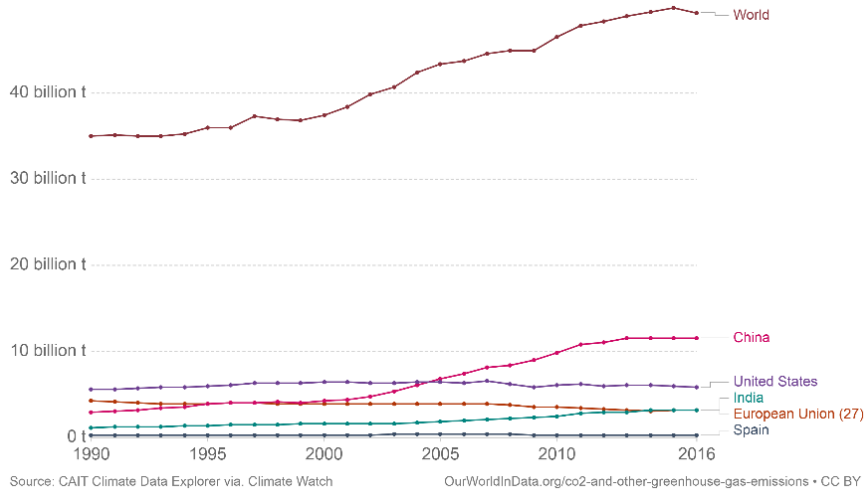


Figura 1: Emisiones de gases de efecto invernadero por país

El objetivo del Acuerdo de París que atañe a este proyecto es el primero, debido a que el transporte es uno de los sectores que más partículas contaminantes emite, el cual emite 7,87 millones de toneladas de CO₂ anuales. Las partículas más contaminantes producidas por los vehículos son el CO₂, CO y NO_x.

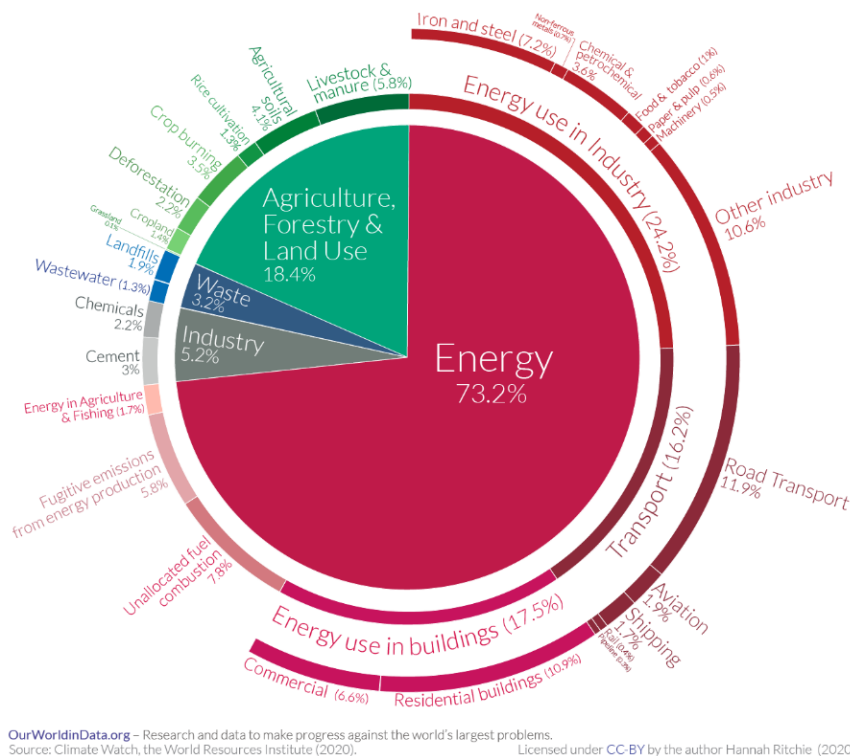


Figura 2: Emisiones de gases de efecto invernadero por sector

En el caso de España, el transporte supone el sector que más gases de efecto invernadero emite a la atmósfera, emitiendo en 2016 un total de 88,8 de los 283,8 millones de toneladas de CO₂, lo que supone un 31% de las emisiones totales (Ritchie & Roser, 2020).

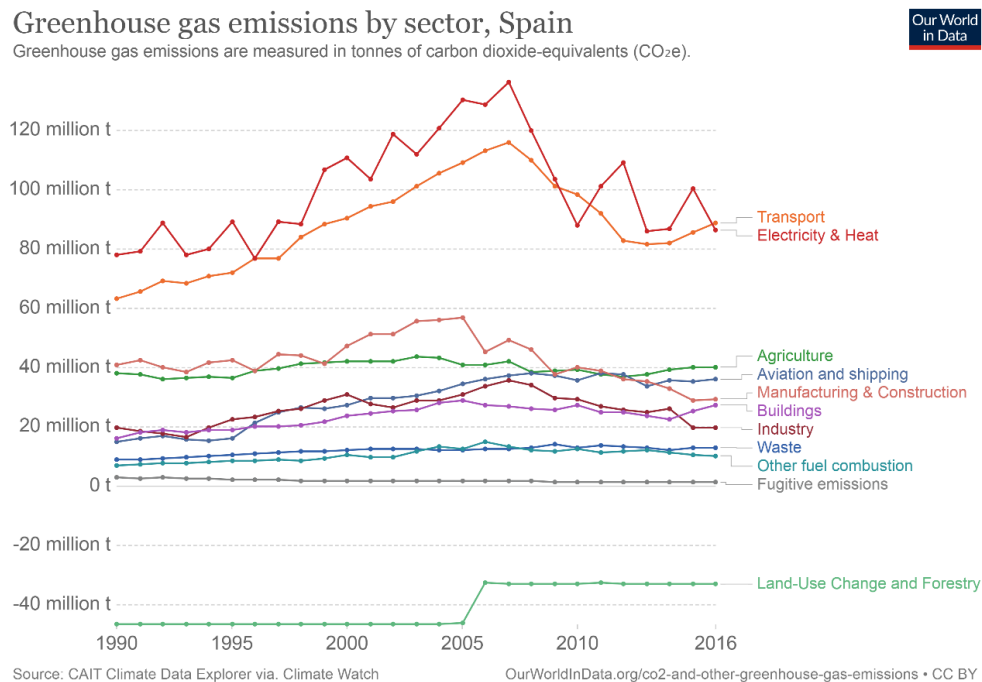


Figura 3: Emisiones de gases de efecto invernadero en España por sector

Es por ello, por lo que muchas de estas medidas se centran en fomentar el uso del transporte público, coche compartido, etc. Además, cada vez son más estrictas las restricciones de la entrada de vehículos contaminantes a los centros urbanos como es el caso de Madrid, Barcelona, Londres y París (Berylls Strategy Advisors, 2019). El gobierno español ha clasificado los vehículos mediante un sistema de etiquetado dependiendo de la contaminación producida de la siguiente manera:

- Vehículos 0: identificados con pegatina azul. Vehículos cero emisiones como BEV, REEV, PHEV o vehículos de pila de combustible.
- Vehículos ECO: identificados con pegatina verde y azul. Vehículos como híbridos enchufables, híbridos no enchufables y los GNC, GLP y GNL.
- Vehículos C: identificados con pegatina verde. Incluye turismos de gasolina y diésel matriculados a partir de 2006 y 2014, respectivamente, cumpliendo las normas Euro 6.
- Vehículos B: identificados con pegatina amarilla. Incluye turismos de gasolina y diésel matriculados a partir de 2000 y 2006, respectivamente, cumpliendo las normas Euro 3 para gasolina y Euro 5 para diésel.
- Vehículo sin distintivo ambiental: vehículos que no cumplen los requisitos de las otras categorías.

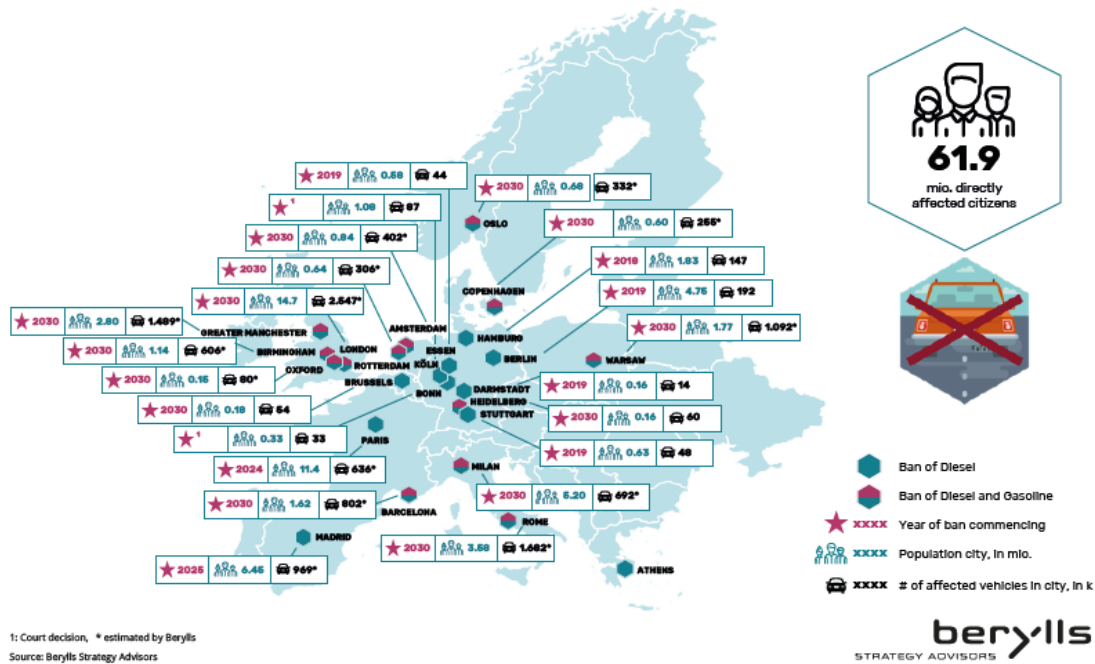


Ilustración 5: Restricciones de tráfico en Europa

Además de las restricciones a los vehículos más contaminantes, el gobierno destina ayudas e incentivos a la adquisición de vehículos más sostenibles, tales como híbridos, eléctricos o de gas natural. Esto hace que se reduzca la diferencia económica y la resistencia al cambio por parte de la sociedad.

Las empresas de transporte son parte fundamental de las emisiones de partículas contaminantes, es por ello, que los gobiernos quieren que estas empresas reduzcan su emisión ya que son una parte importante de las emisiones totales. Algunos mecanismos que utilizan los gobiernos para fomentar el cambio de flota en empresas de transporte son los siguientes:

- Restricción a núcleos urbanos
- Peajes o impuestos por circular o acceder a zonas específicas
- Realización de informes no financieros, incluyendo emisiones de partículas contaminantes
- Ayudas económicas para la adquisición de vehículos limpios
- Objetivos de reducción de emisiones que pueden acarrear sanciones si no se cumplen

Es una realidad que, además de reducir las emisiones de CO2 a la atmósfera, las empresas tienen que ver que este cambio de flota a vehículos limpios es viable económicamente puesto que su objetivo principal es obtener un beneficio económico de su actividad.

En este trabajo, se va a desarrollar una herramienta para optimizar el proceso de electrificación de flotas en las empresas. Como el problema de la contaminación está presente en todo el mundo, es importante que esta herramienta sea replicable y escalable. De esta manera, el programa podrá ser utilizado por cualquier empresa independientemente del sector, tamaño o país en el que se encuentre.

Para analizar los resultados de una empresa en particular, se va a estudiar la estrategia del cambio de flota de vehículos de transporte de dinero en efectivo con el fin de establecer una hoja de ruta cuando la tecnología esté disponible. Loomis es una compañía sueca cuya actividad principal es el transporte de dinero en efectivo y la gestión de efectivo. Esta empresa realiza un gran número de rutas diarias por lo que electrificar la flota de vehículos reduciría la mayor parte de sus emisiones.

Este sector es peculiar y conlleva una gran cantidad de medidas de seguridad como en el caso del transporte, donde es necesario que el vehículo tenga un blindaje especial según cada país. En el caso de España, este blindaje viene especificado en el BOE. Esto añade un gran peso al vehículo, además del peso de la carga que debe tener disponible para la carga de grandes cantidades de billete y moneda. El proyecto se centrará en la base de la empresa en Madrid, España, donde se estudiará la sustitución de los vehículos convencionales por vehículos limpios y los beneficios que puede tener tanto para la empresa como para la sociedad. Más adelante, la empresa podrá estudiar otras delegaciones en las que opere, así como analizar la flota a nivel nacional o internacional. De este modo, la empresa tendrá una visión local y global para planificar un plan de electrificación de la flota acorde con sus necesidades y objetivos.

1.3 Vehículo eléctrico

La necesidad de reducir las emisiones producidas por el ser humano ha hecho que se desarrollen nuevas formas de alimentar los vehículos. Algunas de ellas ya se habían inventado hace décadas pero habían sido eclipsadas por el automóvil con motor térmico. Estas tecnologías no se habían desarrollado debido a su precio, autonomía, peligrosidad, etc. Actualmente, debido a la concienciación de la sociedad, las empresas han decidido apostar por estas tecnologías y continuar mejorándolas para que sean equiparables a los vehículos diésel y gasolina.

Los vehículos híbridos, eléctricos, de hidrógeno o solares son algunas de las tecnologías que se están desarrollando en los últimos años y que prometen en mayor o menor medida ser una de las opciones más extendidas en un futuro cercano. Los vehículos eléctricos son la tecnología por la que más se está apostando tanto por parte de las empresas como por los gobiernos, dando ayudas e incentivos a los usuarios y empresas que adquieran este tipo de vehículos. Sin embargo, todavía hay ciertos aspectos que preocupan a los usuarios y hace que no se esté implementado con tanta rapidez como debería. Algunos de ellos son: el precio, la autonomía y el tiempo de carga del vehículo. Por ello, se trabaja en mejorar y abaratar la tecnología con el fin de conseguir, por lo menos, comparar estas características con los vehículos de motor térmico.

El precio del vehículo es un factor determinante a la hora de comprar un automóvil. Es importante que el precio de venta disminuya en los próximos años para que pueda competir con los vehículos diésel y gasolina. Uno de los componentes más costosos del vehículo es la batería, la cual supone un 35% del precio total del coche. Sin embargo, está previsto que en los próximos años el precio disminuya, al mismo tiempo que mejora la capacidad de almacenamiento y su alcance.

Según la siguiente gráfica, en algunos países ya es más barato tener un vehículo eléctrico o híbrido que uno con motor térmico (Paratus People, 2021). Esto no quiere decir que el precio de venta sea más barato en un vehículo eléctrico que en uno diésel si no que el cost of ownership total en 4 años es menor. Esto quiere decir que, a lo largo de 4 años, el gasto

total sobre el vehículo será menor en un automóvil eléctrico que uno diésel. Esto se debe principalmente al precio de recarga del vehículo ya que la electricidad es mucho más barata que el diésel. Además, los gobiernos dan subsidios por adquirir estos vehículos lo que hace que el precio total disminuya.

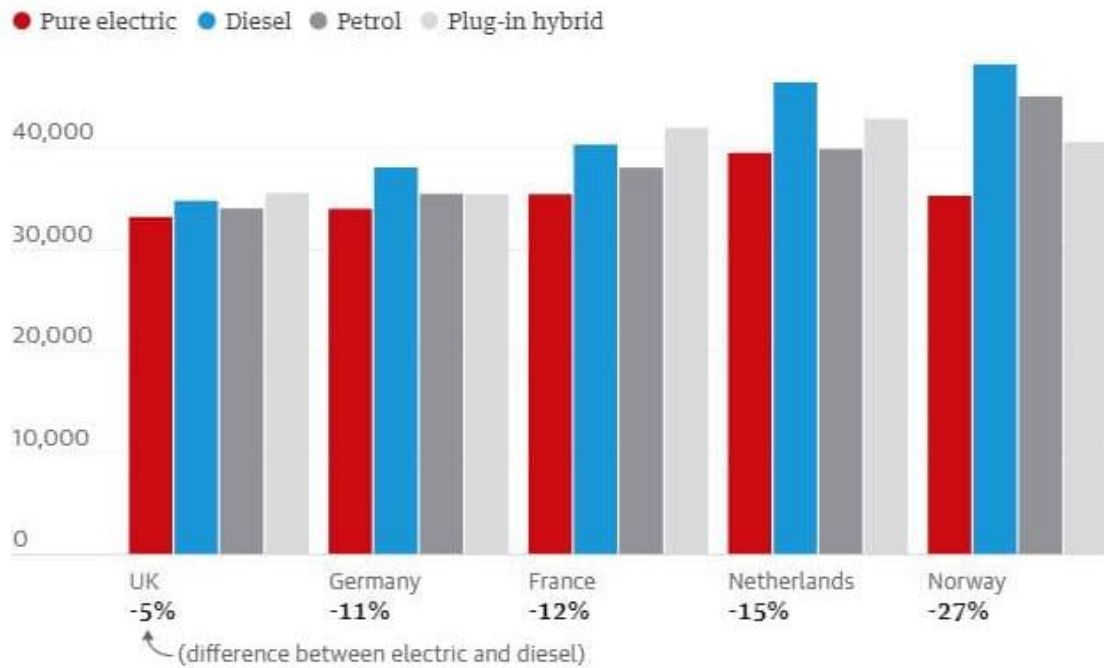


Figura 4: Cost of Ownership de un vehículo VW Golf en diversas tecnologías

Cada vez más son los usuarios que optan por comprar vehículos menos contaminantes sobre todo en las ciudades, donde la contaminación es más visible y el vehículo no tiene que recorrer grandes distancias. La siguiente gráfica muestra la previsión de vehículos comprados en los próximos años. Se observa que el número total de vehículos es mayor cada año pero los vehículos de combustión interna reducen su número a partir del 2023.

Actualmente, el número de vehículos híbridos y eléctricos representa un 5% de las ventas mientras que en el 2030 se aspira que la cifra aumente hasta el 39% del total (Aegonam, s.f.). Los vehículos híbridos y eléctricos aumentan sus ventas con el paso de los años. Los primeros años el aumento es más pronunciado en los vehículos híbridos mientras que en los años finales del estudio aumenta más la venta de vehículos eléctricos.

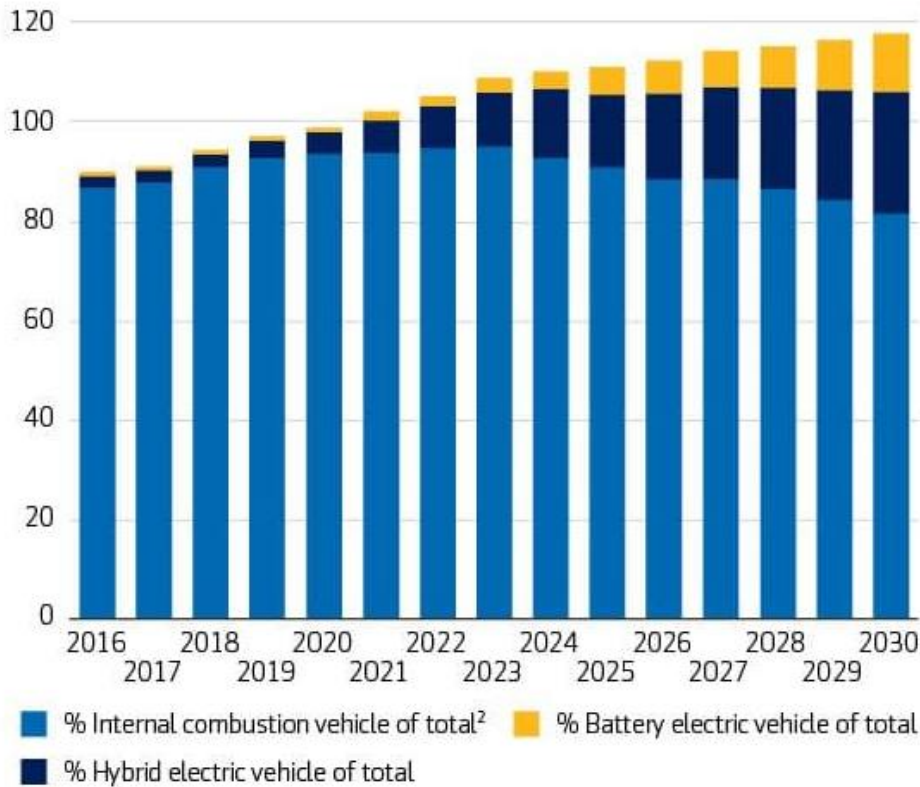


Figura 5: Venta global de vehículos de distintas tecnologías

1.3.1 Baterías eléctricas

Las baterías eléctricas son el componente fundamental de un vehículo eléctrico, puesto que dotan al automóvil de la energía para poder moverse, transformando la energía química almacenada en las baterías en energía eléctrica que, a continuación, alimentará al motor eléctrico transformándose en energía cinética. Sin embargo, las baterías son la principal dificultad a la que se debe hacer frente en esta tecnología debido a diversos motivos:

En primer lugar, las baterías de los vehículos eléctricos necesitan un tiempo más elevado para cargarse en comparación con los vehículos de combustión interna. Estos tiempos varían según el modo de carga del vehículo, que se explicará más adelante, tardando un total de entre 1 hora y 8-10 horas dependiendo de la capacidad de la batería.

Otra problemática de las baterías es la baja densidad energética que tiene, provocando uno de los principales problemas de los coches eléctricos, la baja autonomía que tienen. En el siguiente ejemplo se puede entender cómo, debido a la baja densidad energética, el peso de las baterías con respecto a un depósito de gasolina es mucho mayor y la autonomía de los vehículos es menor.

El nuevo coche eléctrico de la compañía especializada en vehículos eléctricos Tesla, el Model X, tiene una batería de 85 kWh, lo que equivaldría a 9 litros de gasolina que pesa aproximadamente 10 kilogramos. El peso de la batería eléctrica que utiliza este modelo es de 350 kilogramos, es decir, pesa aproximadamente 35 veces más que el depósito de un vehículo convencional.

Por otra parte, el reciclaje de las baterías de litio es complicado, recuperando únicamente el 50% de los componentes y emitiendo CO₂ durante el procedimiento. Una posible solución al respecto es el reciclaje de las baterías para otros usos como puede ser la iluminación de estadios de fútbol como es el caso del Johan Cruyff Arena alumbrado con 148 baterías de coches eléctricos. (Billington, s.f.)

Como se ha mencionado anteriormente, las baterías de litio son las más utilizadas debido a la tensión por celda y a la densidad de energía más elevadas. Aunque también tienen sus desventajas siendo las más caras del mercado. Además, hay otras tecnologías como pueden ser la batería níquel-cadmio, níquel-hidruro metálico, plomo-ácido, Zebra, aluminio-aire o zinc-aire. Todas estas baterías tienen algunas desventajas como efecto memoria o mayor peso (baja densidad energética).

Las baterías de ion de litio, las más utilizadas en la actualidad, no pueden utilizar su capacidad completa ya que no se pueden cargar ni descargar completamente. Para diferenciar entre la capacidad total y la real de la batería se habla de la capacidad nominal y la capacidad efectiva. En el ejemplo, de los 85 kWh que posee el Tesla Model X, solo estarían disponibles 78 kWh que son la capacidad efectiva de la batería, como si en un coche de gasolina no pudiéramos utilizar parte de los litros que se quedarían en el depósito.

El precio de las baterías eléctricas es uno de los grandes costes de un vehículo eléctrico. Este componente supone aproximadamente un 35% del valor total del automóvil. Al ser una tecnología en desarrollo, los precios de estas son muy elevados puesto que tienen que recuperar la inversión en investigación y desarrollo y todavía no se ha perfeccionado la técnica.

Para este trabajo, es muy importante poder predecir cómo va a variar el precio de este componente, puesto que así lo hará también el del propio vehículo. Bloomberg NEF publica cada año una predicción de la evolución del precio de las baterías de litio que resulta bastante fiable puesto que han ido prediciendo correctamente el precio a lo largo de los años. En la siguiente tabla se puede observar el precio de la batería de litio durante los últimos años. Claramente se observa que el precio está disminuyendo cada año que pasa pues la tecnología utilizada cada vez es más eficaz y más barata. Además, con la producción de baterías de litio en serie, el coste de fabricación del componente disminuye considerablemente, entorno a un 40% respecto al coste actual (Henze, 2020).

Figure 1: Volume-weighted average pack and cell price split



Source: BloombergNEF

Figura 6: Evolución del precio de las baterías de litio

Bloomberg NEF marca dos fechas clave en la evolución del precio de la batería de litio. El primero de ellos es el año 2023, fecha en la que el precio bajará de la barrera de los 100\$/kWh (Henze, 2020). Esta cifra significará la paridad entre los vehículos diésel y eléctricos. Esto quiere decir que el precio de venta más costes de mantenimiento de los dos automóviles será muy similar y ya no será una dificultad el alto valor de adquisición de los coches eléctricos.

La otra fecha clave es el año 2030. Este año está marcado por el objetivo de reducción de emisiones acordado en París. Debido a ello, muchas empresas tendrán que reducir considerablemente sus emisiones en los próximos años para alcanzar un 55% de reducción de emisiones de CO₂ respecto a las emitidas en 1990. El precio de las baterías de litio debería de tener un valor de 58\$/kWh (Henze, 2020).

1.4 Vehículos Blindados

Los vehículos blindados son una pieza fundamental para las empresas dedicadas al transporte de efectivo. La principal función que tiene el blindaje del vehículo es la protección del interior del vehículo, tanto del efectivo como de los trabajadores. Loomis opera en 18 países en Europa donde cada uno de ellos se rige por una ley de seguridad que parametriza en mayor o menor medida como deben de ser este tipo de vehículos. Algunos países, como por ejemplo Suiza, los vehículos blindados no tienen que cumplir ningún tipo de requerimiento, por lo que el blindaje del vehículo lo decide la empresa. En otros países, como Noruega o Suecia, no es necesario el blindaje en los automóviles y está prohibida la tenencia de armas por parte de los trabajadores.

En España, la configuración y tipo de blindaje en los vehículos lo determina el Boletín Oficial del Estado número 42 del viernes 18 de febrero de 2011. El artículo 10, destinado a los vehículos de transporte de fondos, valores y objetos valiosos o peligrosos, divide el vehículo en tres compartimentos:

- Compartimento delantero: se situará el conductor. Estará separado del compartimento central por una mampara blindada sin acceso

- Compartimento central: viajarán dos vigilantes de seguridad. Estará separado del compartimento posterior a través de una mampara blindada con una puerta blindada de acceso a la zona de carga. Esta puerta no puede ser abierta simultáneamente con las puertas de salida de los vigilantes. La mampara central debe tener un mecanismo que permita la introducción de objetos e impida su sustracción.
- Compartimento posterior: destinado a la carga, dividido en dos zonas, la de reparto y la de recogida. Dispone de una puerta trasera que se abrirá exclusivamente en zonas de máxima seguridad.

A su vez, el BOE exige cumplir con los siguientes niveles de resistencia en los blindajes de los vehículos, determinados por la Norma UNE-EN 1063 para blindajes transparentes y la Norma UNE 108132 para blindajes opacos:

1. Perímetro exterior de los compartimentos delantero, central y de la mampara delantera: BR5.
2. Perímetro exterior del compartimento posterior y suelo del vehículo: BR3.
3. Mampara de separación entre los compartimentos central y posterior: BR4.
4. Mampara de separación entre las zonas de carga: BR3.

La siguiente tabla muestra la resistencia que deben de tener cada uno de los tipos de blindaje anteriormente mencionados. Esto sirve de ejemplo para hacerse una idea del nivel de protección que deben de llevar este tipo de vehículos. Cabe destacar que siempre se prima la protección del conductor y vigilante por delante de la del dinero, dotando de niveles de blindaje más elevados a las zonas donde están situados.

Tabla 5: Niveles de blindaje según el Estándar Europeo

Estándar Europeo								
Clase	Tipo de Arma	Calibre	Tipo	Masa (g)	Rango (m)	Velocidad (m/s)	Energía de Impacto	Disparos
BR1	Pistola/Revólver/Rifle	.22 LR	LB/RN	2,6 ± 0,1	10,00 ± 0,5	360 ± 10	170 J	3
BR2	Pistola/Revólver	9×19mm Parabellum	FJ/RN/SC	8,0 ± 0,1	5,00 ± 0,5	400 ± 10	640 J	3
BR3	Pistola/Revólver	.357 Magnum	FJ/CB/SC	10,2 ± 0,1	5,00 ± 0,5	430 ± 10	940 J	3
BR4	Pistola/Revólver	.44 Magnum	FJ/FN/SC	15,6 ± 0,1	5,00 ± 0,5	440 ± 10	1510 J	3
BR5	Rifle	5.56×45mm NATO	FJ/PB/SCP	4,0 ± 0,1	10,00 ± 0,5	950 ± 10	1800 J	3
BR6	Rifle	7.62×51mm NATO	FJ/PB/SC	9,5 ± 0,1	10,00 ± 0,5	830 ± 10	3270 J	3
BR7	Rifle	7.62×51mm NATO	FJ/PB/HC	9,8 ± 0,1	10,00 ± 0,5	820 ± 10	3290 J	3

1.5 Transporte sostenible en entornos urbanos

Hoy en día, gran parte de la población está concentrada en grandes núcleos urbanos. En este lugar confluyen, en poco espacio, numerosos elementos tales como habitantes, industria, ocio, etc. Una de las grandes ventajas de los grandes núcleos urbanos es la cercanía de cualquier tipo de actividad o servicio a tu casa, pudiendo realizar infinidad de experiencias sin tener que recorrer grandes distancias. Además, en estos núcleos urbanos se realiza gran parte de la actividad industrial y servicios, lo que lleva a la gente que trabaja en dichas empresas a buscar, en la ciudad, un sitio cercano a su lugar de trabajo.

Debido a la gran densidad de población en las ciudades, se crean problemas derivados de ellas, los cuales son convenientes tratar e intentar solucionar para poder seguir disfrutando de las ventajas y comodidades de las ciudades. En los siguientes puntos se tratarán tres de los problemas más importantes de los centros urbanos, todos ellos relativos al área del transporte.

1.5.1 Contaminación acústica

La contaminación acústica no ocupa el primer lugar en las preocupaciones sociales, pero las ciudades se han convertido en el epicentro de este tipo de contaminación, debido a la gran densidad de población al concentrarse gran cantidad de personas, industrias y transporte. La contaminación acústica se define como la presencia en el ambiente de ruidos o vibraciones, cualquiera que sea el emisor acústico que los origine, que impliquen molestia, riesgo o daño para las personas o causen efectos significativos sobre el medio ambiente (Ministerio para la transición ecológica, s.f.). En España, la ciudad de Barcelona se sitúa como la séptima ciudad más ruidosa del mundo mientras que Madrid se encuentra en la decimosexta posición (Mimi Hearing Technology, 2020). Se define como ruido cualquier sonido que supere los 65 dB debido a que el ruido daña nuestra salud si supera los 75 dB y se vuelve doloroso si supera los 120 dB. En España, casi 9 millones de personas viven por encima de la considerada sonoridad saludable y somos el segundo país con más índice de población expuesta a ruidos por detrás de Japón. (Rodríguez Ripa, 2017). La siguiente tabla muestra la cantidad de decibelios producidos en determinadas situaciones, causantes en gran medida de la contaminación acústica a la que la población se ve expuesta cada día.

Tabla 6: Nivel de intensidad del sonido

Nivel de intensidad del sonido.	
200 dB	Bomba atómica similar a Hiroshima y Nagasaki
180 dB	Explosión del Volcan Krakatoa. Cohete en Despegue
140 dB	Umbral del dolor
130 dB	Avión en despegue
120 dB	Motor de avión en marcha
110 dB	Concierto / acto cívico
100 dB	Perforadora eléctrica
90 dB	Tráfico
80 dB	Tren
70 dB	Aspiradora
50/60 dB	Aglomeración de gente
40 dB	Conversación
20 dB	Biblioteca
10 dB	Respiración tranquila
0 dB	Umbral de audición

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), es uno de los factores ambientales que provoca más problemas relacionados con la salud. En Europa, se han contabilizado 16600 muertes prematuras y 72000 hospitalizaciones al año causadas por la contaminación acústica (Iberdrola, s.f.). Algunos de los problemas más frecuentes causados por la contaminación acústica son (Santa Lucía, 2018):

Transporte de última milla

- Problemas auditivos: pérdida progresiva de la audición o pitidos constantes.
- Problemas del sueño: insomnio, cansancio o déficit de atención.
- Problemas psicológicos: estrés, ansiedad, agresividad, etc.
- Problemas fisiológicos: alteración del ritmo cardiaco, respiratorio o aumento de la presión arterial.

La contaminación acústica es causada por numerosas fuentes, de las cuales destacan las siguientes en las grandes ciudades:

- Transporte: es el principal foco de contaminación acústica debido a la gran cantidad de automóviles en circulación. Los ruidos más importantes en los vehículos son el motor y el claxon, alcanzándose un nivel sonoro de entre 90 y 100 dB.
- Aviones: aunque el número de aviones que sobrevuelan la ciudad es mucho menor que el de los automóviles, su impacto a nivel sonoro es mucho mayor, produciendo 130 dB durante su funcionamiento.
- Construcción: todo tipo de nueva edificación, remodelación o construcción tiene un gran impacto acústico en las ciudades pudiendo a llegar a un nivel sonoro de 110 dB al utilizar un martillo neumático.
- Ocio: este apartado incluye los bares, discotecas, terrazas que generan gran ruido ya sea por la música como por las personas que se encuentran en él. Para los vecinos cercanos a estos locales puede suponer una fuente constante de contaminación acústica llegando a niveles de 110 dB.

Según un estudio, el 80% de la contaminación acústica es producida por los coches, siendo un gran problema en las ciudades, debido a la congestión del tráfico. El otro 20% lo representan otro tipo de transportes como el ferroviario o el aéreo, las obras y los bares y locales de ocio. _(Sancho, 2016). En lo relativo a la contaminación acústica, los coches eléctricos mejoran sustancialmente el ruido emitido por los vehículos. El motor eléctrico, además de no emitir partículas contaminantes, no emite ruido, por lo que el único ruido que produce este tipo de automóviles es la fricción de las ruedas en la calzada y el ruido del claxon si este fuese necesario.

El ruido emitido es tan bajo que preocupa la posible pérdida de la percepción por parte de los peatones o ciclistas de estos vehículos. Según la Organización Nacional de Ciegos Españoles (ONCE), la probabilidad de choque con una persona aumenta un 40% en los coches silenciosos en comparación a los coches tradicionales (Mosquete & Gilmartín, 2015). Según un estudio realizado por el Observatorio Cetelem Europeo del Automóvil, los europeos califican positivamente el silencio de los coches eléctricos, sin olvidar la peligrosidad anteriormente mencionada (Observatorio Cetelem, 2012).

Tabla 7: Encuesta sobre el silencio del vehículo eléctrico

El silencio del vehículo eléctrico será...
(% «completamente de acuerdo» y «más bien de acuerdo»)

	DE	BE	ES	FR	IT	PL	PT	UK	RU	TR	Media 10 países
Positivo para el entorno acústico	87 %	94 %	94 %	95 %	94 %	94 %	98 %	90 %	96 %	96 %	94 %
Un elemento nuevo al que habrá que adaptarse	81 %	88 %	85 %	86 %	81 %	81 %	77 %	84 %	82 %	85 %	83 %
Menos estresante para la conducción	61 %	65 %	81 %	69 %	76 %	73 %	84 %	56 %	80 %	82 %	73 %
Peligroso para los peatones	67 %	67 %	43 %	70 %	41 %	45 %	48 %	68 %	41 %	42 %	53 %

Fuente: Observador Cetelem

Debido a esta preocupación, la Unión Europea ha aplicado una nueva legislación para que este tipo de vehículos no supongan un problema para la seguridad vial. Desde el 1 de julio de 2019, el uso del sistema de alerta acústica de vehículos (AVAS) es obligatorio en Europa, con un sonido similar al de un motor de combustión tradicional entre los 56 y 75 dB cuando circulen a menos de 20 kilómetros por hora o circulen marcha atrás (Moreno, 2019). Cuando la velocidad es superior, las ruedas de los coches emiten algo de ruido por lo que se puede percibir el coche aun siendo mucho más silencioso que un vehículo convencional.

En las ciudades, la contaminación acústica es muy intensa debido a la gran cantidad de vehículos circulando diariamente por las calles y por la gran congestión en horas punta. Por ello, este problema, este problema es determinante en la calidad de vida de sus habitantes y en su bienestar. El artículo de la revista Ingeniería profundiza más sobre este tema. (Orozco Medina & Elizabeth, 2015).

1.5.2 Contaminación ambiental

A mediados del siglo XX, 3 de cada 10 personas vivían en núcleos urbanos. En la actualidad, 5 de cada 10 personas viven en ellas. La Organización de Naciones Unidas (ONU) cree que el crecimiento de población en los próximos 30 años se hará entorno a las ciudades (United Nations, 2017). El rápido crecimiento de las ciudades ha traído numerosos problemas como consecuencia de la alta densidad de población.

Uno de los mayores problemas es la contaminación del aire, la cual se debe principalmente a la emisión de partículas contaminantes como el dióxido de carbono (CO₂). Según un estudio del World Resources Institute en 2009, el 75% del CO₂ emitido a la atmósfera es generado en las ciudades (World Resources Institute, s.f.). La contaminación ambiental en las ciudades es causante de alrededor de un millón de muertes prematuras cada año.

Cada año, IQ Air publica el listado con las ciudades con peor calidad del aire del planeta. El estudio se basa en la recogida de datos agregados de más de 80.000 puntos en todo el mundo. (IQAir, 2020). La puntuación de las ciudades se determina debido a la concentración de PM_{2.5} (µg/m³). Las partículas en suspensión de menos de 2,5 micras, o también conocidas como PM_{2.5}, son el mejor indicador de la contaminación ambiental

en ciudades, ya que son las que emiten los vehículos diésel y tienen los peores efectos en nuestra salud (Ecologistas En Acción, 2008).

El trabajo de Cristina Linares y Julio Díaz profundiza en el comportamiento de estas partículas en la ciudad de Madrid y su impacto en los ingresos hospitalarios (Linares & Díaz, 2008). Los problemas derivados por la exposición constante a estas partículas son de tipo respiratorio y cardiovascular, ya que, al ser partículas pequeñas, viajan a los alvéolos pulmonares, entrando en los vasos sanguíneos. En el estudio se utilizaron el número de ingresos en el hospital Gregorio Marañón desde 2001 a 2005. Se contabilizaron los ingresos por causas orgánicas, por lo que no se incluyeron traumatismos o partos. Por otro lado, se recolectó la información de concentraciones PM2.5 de cada día.

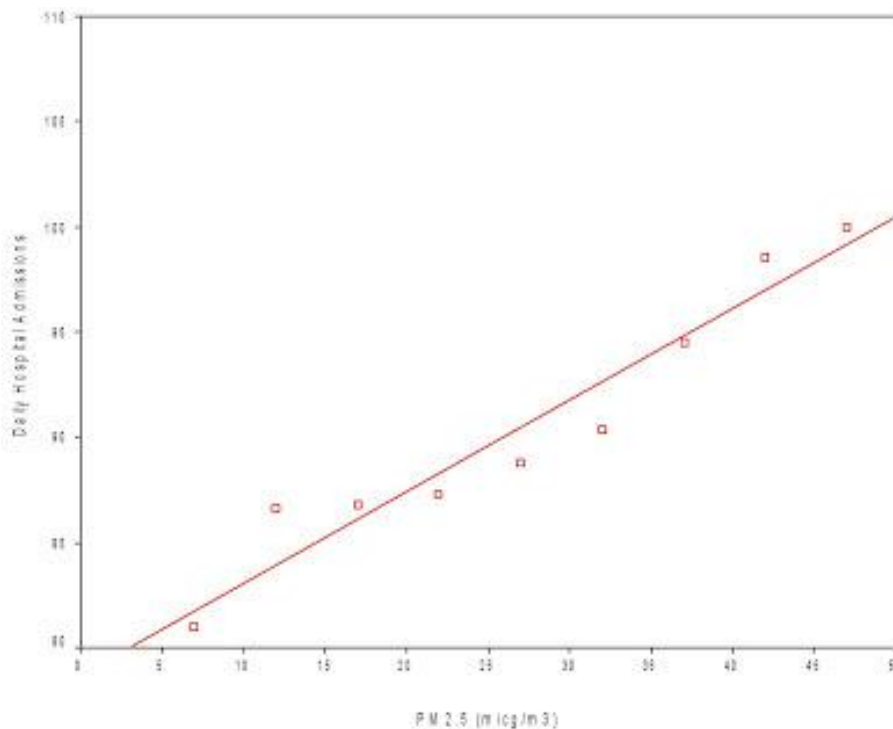


Figura 7: Relación entre las hospitalizaciones y los niveles de contaminación

Como se observa en la gráfica, existe una correlación entre los ingresos en el hospital y los niveles de concentración de PM2.5 en la ciudad de Madrid. La concentración media en Madrid durante los años del estudio fue de 19,1 µg/m³, superior a la recomendada por la Organización Mundial de la Salud. Otras ciudades del mundo que alcanzan niveles de más de 100 µg/m³ notarán mucho más el efecto de estas partículas en la salud.

Volviendo al estudio de IQ Air, la siguiente tabla muestra las distintas categorías en las que se clasifican las ciudades según su concentración de PM2.5:

Tabla 8: Categorías de ciudades según su concentración de PM 2.5

Categoría	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Objetivo OMS	0-10
Bueno	10-12
Moderado	12.1-35.4
Perjudicial para grupos sensibles	35.5-55.4
Perjudicial	55.5-150.4
Muy perjudicial	150.5-250.4
Peligroso	>250.4

Según este estudio, en el 2020, las ciudades más contaminantes del mundo se encuentran en India, China, Pakistan y Bangladesh, que tienen unos niveles de concentración de CO₂ considerados “perjudiciales” (IQAir, 2020).

Tabla 9: Ranking de las ciudades más contaminadas del mundo

Puesto	Ciudad	MED. 2020	MED. 2019	MED. 2018	MED. 2017
1	Hotan, China	110.2	110.1	116	91.9
2	Ghaziabad, India	106.6	110.2	135.2	144.6
3	Bulandshahr, India	98.4	89.4	-	-
4	Bisrakh Jalalpur, India	96	-	-	-
5	Bhiwadi, India	95.5	83.4	125.4	-
6	Noida, India	94.3	97.7	123.6	134
7	Greater Noida, India	89.5	91.3	-	-
8	Kanpur, India	89.1	48.5	88.2	119.2

Transporte de última milla

Puesto	Ciudad	MED. 2020	MED. 2019	MED. 2018	MED. 2017
9	Lucknow, India	86.2	90.3	115.7	119.2

En Europa, las ciudades más contaminantes se encuentran en Serbia y Bosnia y Herzegovina. Se puede observar que los niveles de estas ciudades se sitúan por debajo de la mitad de los valores de las ciudades anteriormente mencionadas. Estos valores de concentraciones están catalogados como “moderados” o “perjudiciales para grupos sensibles” (IQAir, 2020).

Tabla 10: Ranking de las ciudades más contaminadas de Europa

Puesto	Ciudad	MED. 2020	MED. 2019	MED. 2018	MED. 2017
1	Orzesze, Poland	44.1	-	-	-
2	Sarajevo, Bosnia Herzegovina	42.5	34.1	38.4	-
3	Valjevo, Serbia	41.5	37.9	-	-
4	Lukavac, Bosnia Herzegovina	37.7	39.9	55.6	-
5	Doboj, Bosnia Herzegovina	37.6	-	-	-
6	Kosjeric, Serbia	36.7	28.8	-	-
7	Zivinice, Bosnia Herzegovina	34.6	-	-	-
8	Vushtri, Kosovo	34.3	-	-	-
9	Gaggiano, Italy	32.7	-	-	-
10	Tuzla, Bosnia Herzegovina	32.1	35.3	43.1	-
11	Nis, Serbia	32	32.4	-	-

En España, exceptuando Las Palmas de Gran Canaria, no hay ninguna ciudad que sobrepase los 23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Todas las ciudades están consideradas como “moderadas” (IQAir, 2020).

Tabla 11: Ranking de las ciudades más contaminadas de España

Puesto	Ciudad	MED. 2020	MED. 2019	MED. 2018	MED. 2017
1	Las Palmas de Gran Canaria, Spain	31	-	-	-
2	Arucas, Spain	22.8	7.8	7.8	11.4
3	Arafo, Spain	17.8	12.5	-	-
4	Murcia, Spain	16.1	-	-	-
5	Santa Cruz de la Palma, Spain	14.9	7.4	-	-
6	Lorca, Spain	14.5	-	-	-
7	Puertollano, Spain	14.4	17.5	-	-
8	A Coruna, Spain	14	12	13.5	13.7
9	La Aljorra, Spain	14	-	-	-
10	Alcantarilla, Spain	13.8	-	-	-

Otro artículo evalúa en 5 ciudades españolas el impacto en la salud de la contaminación atmosférica. Las ciudades estudiadas son Barcelona, Bilbao, Valencia, Madrid y Sevilla. Controlando las partículas en suspensión de menos de 10 micras (PM10), los resultados concluyeron que al exceder de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, la contaminación es causante de 1,4 muertes por cada 100.000 habitantes al año. De estos fallecimientos, el 50,7% es por causas cardiovasculares y el 26% por causas respiratorias (Alonso Fustel, Martínez Rueda, & Cambra Cotín, 2005).

1.5.3 Congestión del tráfico urbano. Optimización de rutas

La congestión del tráfico es uno de los principales problemas en las ciudades actuales. Este asunto ha ido en aumento en muchos países distintos y, según lo estimado, seguirá agravándose. No se trate de un problema menor de nuestras vidas, puesto que influye sobre la calidad de la vida en los núcleos urbanos. Debido al aumento de vehículos en circulación y el uso que hacemos de ellos, ha puesto la capacidad de las calzadas en una situación extrema. Los efectos de la congestión recaen en los usuarios que circulan sobre esa vía, ya sea directamente por el aumento del tiempo en el trayecto, como indirectamente al aumentarse los niveles de contaminación acústica y ambiental.

La Real Academia Española de la Lengua (RAE) define congestionar como obstruir o entorpecer el paso, la circulación o el movimiento de algo. Entrando en un nivel más técnico, es más difícil determinar cuándo comienza una congestión, es decir, el momento en el cual pasa de un nivel de tráfico normal a una obstrucción de la circulación. En una situación normal de tránsito, los vehículos circulan a una velocidad que ellos determinan, siempre y cuando estén en los límites de velocidad de la vía. Sin embargo, en una congestión, al haber mayor concentración de vehículos, cada vehículo estorba el desplazamiento de los demás, haciendo que estos circulen a una velocidad inferior a la que irían en una situación normal. Una definición objetiva sería: “la congestión es la condición que prevalece si la introducción de un vehículo en un flujo de tránsito aumenta el tiempo de circulación de los demás” (Thomson & Bull, 2001).

Debido a la gravedad de la situación del tráfico en las ciudades, se han tenido que llevar a cabo políticas para racionalizar el uso de las vías públicas. Estas acciones deben de estar presentes en todo momento y serán diferentes según el tipo de ciudad y las condiciones del tráfico. En algunos casos, esta situación se ve agravada debido a los problemas de diseño y conservación de las vías en las ciudades o el estilo de conducción de los vehículos.

Según un estudio realizado por la empresa de GPS TomTom, Barcelona es la ciudad española con más congestión en 2019 con un nivel de congestión del 29%, seguido por Granada, Palma de Mallorca y Madrid. A nivel mundial, Barcelona ocupa la posición 140, un ranking liderado por países como India, Filipinas, Colombia y Turquía con niveles de congestión entre el 59% y el 71%. (TOMTOM, s.f.). Estos niveles de congestión significan que, en un viaje por Nueva Delhi de una hora, se aumentará en un promedio de 42,6 minutos debido a la congestión. Lo más significativo del estudio es que solo 63 de las 416 ciudades estudiadas han disminuido sus niveles de congestión, por lo que resalta que no se están tomando las medidas apropiadas para su reducción.

Según la Dirección General de Tráfico (DGT), casi 1 millón de personas en Madrid se quedan atrapadas por el atasco todos los días. Los estudios realizados por la Fundación RACC aproximan el coste de los atascos en Madrid cerca de los 3,4 millones de euros al día (839 millones de euros al año), un 0,6% del producto interior bruto de la comunidad (Lopez, 2009). Para entender la congestión del tráfico en esta ciudad, se ha de estudiar los niveles de congestión por franjas horarias.

El siguiente gráfico muestra los niveles de congestión de la ciudad de Madrid entre los días 6 y 13 de abril del 2021. Además, estos niveles se comparan con los de los años 2019 y 2020. Como se puede observar, los niveles de congestión en el año 2019 fueron significativamente superiores a los de 2020 y los actuales, sobre todo en los días laborables. Esto se debe a la pandemia del Covid19 ya que muchas personas que residen

en la ciudad empezaron a tele trabajar y se evitan parte de los trayectos para ir a los puestos de trabajo.

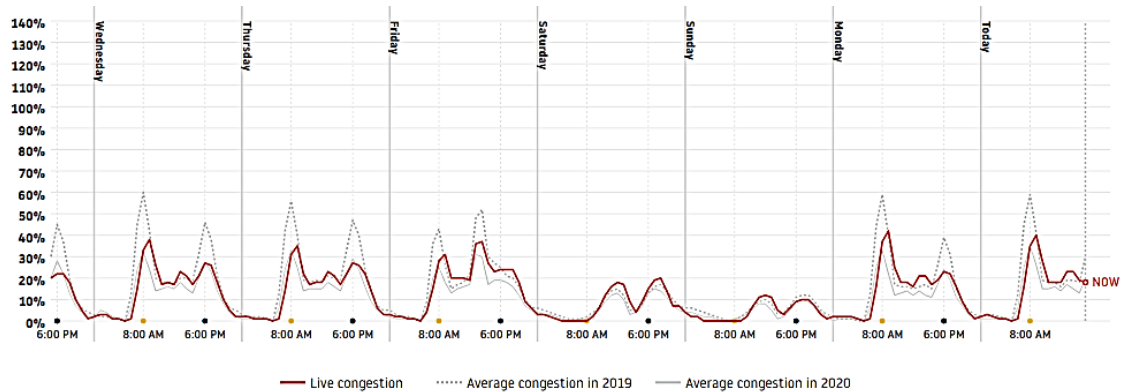


Figura 8: Congestión del tráfico en la ciudad de Madrid

En Madrid, los días laborables se producen picos muy significativos entre las 7 y las 9 de la mañana y entre las 5 y 7 de la tarde, tiempo en el cual la mayoría de las personas entran y salen de sus puestos de trabajo. Este periodo de tiempo coincide con la entrada y salida de los menores a los colegios, lugar en el que se producen grandes aglomeración para dejar o recoger a los hijos. En estos picos de congestión se alcanzaron en 2019 una media de 50% de congestión mientras que en otras franjas horarias el nivel de congestión está entre el 10 y el 20% (TOMTOM, s.f.).

Para disminuir la congestión del tráfico en las grandes ciudades no hay una solución clara y efectiva que vaya a funcionar en todas ellas. Cada núcleo urbano tiene peculiaridades, horarios, modo de conducción o distribución distintos a los demás, lo que lo hacen único y deba adoptar medidas específicas. Algunas de las medidas más radicales que se han instaurado para disminuir la congestión del tráfico son:

- Pagar a los conductores para que no usen sus vehículos: Reino Unido está probando pagar 3000 libras al año a los conductores que no utilicen sus vehículos. Este dinero podrá ser utilizado para pagar el transporte público u otras alternativas limpias.
- Eliminar los aparcamientos en las calles: Oslo descubrió que la mayoría de los vehículos que transitaban por la calle era para buscar aparcamiento por lo que decidió eliminarlos. Esta medida funcionó, dejando las calles más despejadas para los usuarios y haciendo que los conductores tuvieran un sitio fijo donde dirigirse.
- Transporte público gratuito: Luxemburgo cuenta con transporte público gratuito desde 2019 para aliviar el tráfico en el país, ya que era el país europeo con más coches por habitantes.
- Resucitar el tranvía: Nueva York destinará 2500 millones de dólares para resucitar el tranvía que une Queens con Brooklyn esperando que sean utilizados por 50000 personas al día.

Es destacable la diferencia de medidas que se deben de tomar según el país en el que se esté. En países en desarrollo, las infraestructuras están menos desarrolladas y se pueden establecer con el fin de mejorar los niveles de congestiones. En países desarrollados, las ciudades están muy restringidas al cambio para la mejora del tráfico, es por ello que las

medidas que se suelen tomar están enfocadas al menor uso del vehículo privado y a fomentar el transporte público.

Los vehículos privados son poco eficientes para el traslado de personas, ya que cada ocupante produce en las horas punta alrededor de 11 veces la congestión que produce a cada pasajero de bus (Thomson & Bull, 2001). Este cálculo se realiza en base a dos parámetros:

- Tipo de vehículo: medido en Passenger car unit (pcu) en el que se mide el espacio que ocupa, siendo 1 en un coche, 2 en un camión y 3 en un autobús.
- Número de personas en el vehículo: personas que circulan dentro del habitáculo. En el caso del coche se estima 1,5 mientras que el autobús transporta 50 personas en promedio.

Aunque un autobús ocupe más espacio para la contabilización de la congestión, el hecho de transportar muchas personas hace que a nivel global produzca menos obstrucción del tráfico:

$$\frac{\text{Congestión}_{\text{autobús}}}{\text{Congestión}_{\text{coche}}} = \frac{\frac{N^{\circ}\text{Personas}}{PCU}_{\text{autobús}}}{\frac{N^{\circ}\text{Personas}}{PCU}_{\text{coche}}} = \frac{50/3}{1,5/1} = 11,11 \text{ veces menor}$$

Sin embargo, conviene mencionar que aunque los autobuses transporten a una gran cantidad de personas, también es un obstáculo para el tráfico de las ciudades. La menor maniobrabilidad de estos automóviles hace que haya más saturación en zonas estrechas y con muchas curvas.

En el caso de Madrid, el gobierno municipal presentó un plan con 30 medidas con el fin de mejorar el tráfico en la capital del país, además de mitigar los efectos de la contaminación acústica y ambiental provocada por el gran número de vehículos que circulan por las vías de la ciudad (Ayuntamiento de Madrid, 2020). Entre estas medidas destacan las siguientes:

- Área Central Cero Emisiones: zona central de Madrid en el que solo pueden circular los vehículos permitidos.
- Mejora de la red ciclista: Añadir carriles para ciclistas, además de fomentar la circulación en bicicletas y mejorar el sistema público de ellas, llamado BiciMAD.
- Regulación del aparcamiento: aplicar tarifas distintas en los parquímetros dependiendo de los niveles de contaminación que tenga de cada coche.
- Limitación de velocidad: limitación a 70 km/h en la carretera de circunvalación M-30, que rodea la ciudad de Madrid.
- Fomentar el transporte público: ampliación de la flota de transporte público y mejorando las infraestructuras reservadas para su uso.
- Distribución de mercancías con vehículos de bajas emisiones: preferencia de acceso y de horario en el área central de la ciudad y en las zonas de aparcamiento limitado.

- Red de recarga para vehículos eléctricos: programa para el desarrollo de redes de recarga en edificios y en lugares de trabajo para fomentar la compra y uso de este tipo de vehículos.
- Impulso de la movilidad compartida: se apoyarán las iniciativas de movilidad compartida para mejorar y diversificar la oferta de transporte en Madrid.

Para las empresas de distribución, la congestión del tráfico es un tema muy importante por muchas razones ya que se pretende dar un servicio eficiente, con coste bajo y en el menor tiempo posible. En primer lugar, el coste para la empresa de tener un vehículo consumiendo gasolina y teniendo que pagar por ese tiempo al conductor del vehículo. A continuación, la mala imagen de la empresa al cliente, retrasando la entrega o recogida del producto y pudiendo acabar en la devolución de parte del dinero. A esto se le añade las restricciones propias del sector en el que se encuentre la empresa, por ejemplo, alimentos que no deban estar mucho tiempo sin refrigeración. En el caso de Loomis, a nivel de seguridad la congestión es un mal enemigo al tener que estar parado en un lugar concreto un tiempo relativamente elevado, además de pagar ese tiempo a las tres personas que se encuentran en el vehículo.

En definitiva, la congestión del tráfico siempre es un problema para este tipo de empresas, al cual tienen que hacer frente e intentar mitigarlo en la medida de lo posible. Algunas de las estrategias de las empresas para no verse tan afectadas por esta situación son:

- Elección del tipo de transporte: dependiendo del producto que se quiera transportar, es posible elegir el medio de transporte. Un ejemplo muy claro es el caso de las compañías de entrega de comida a domicilio que utilizan bicicletas y motos para hacer el reparto.
- Horarios de entrega flexibles: acordar con el cliente una franja horaria en la cual se puede hacer la recogida o entrega del producto, con el fin de contar con un margen de tiempo suficiente en el caso de tener congestión.
- Planificación de rutas: coordinar las rutas de distribución en función de las vías que tengan menor congestión, logrando un tiempo menor, aunque no necesariamente con la distancia más corta.

La optimización de rutas es una herramienta cada vez más usada por las empresas de logística para realizar sus servicios en el menor tiempo posible, un factor clave para este sector. Algunas de las ventajas son el ahorro de tiempo, la mejor gestión del transporte, aumento de la productividad y la satisfacción del cliente. Según la empresa TCOS, la reducción de costes por utilizar un software para la optimización de rutas ronda entre el 30% y el 50% de los costes habituales (Novologística, 2019).

Importantes empresas de distribución como Correos o UPS están incorporando softwares para la optimización de rutas. Estos softwares son potentes y combinan la información de mapas y tráfico con la parametrización y restricciones propuestas por la empresa. El objetivo de esta herramienta es encontrar la mejor solución para las rutas de vehículos, con el fin de conseguir rutas con menores tiempos. Cada sector y compañía tendrán sus propios parámetros a los que este software debe hacer frente. Estos son algunos de los más comunes:

- Número de vehículos disponibles

- Puntos de servicio en el día y su posicionamiento geográfico
- Disponibilidad horaria de los puntos de servicio (franja horaria)
- Límite de kilómetros por vehículo
- Tiempo de un vehículo en ruta
- Capacidad máxima en cada vehículo
- Accesibilidad de los vehículos: limitaciones por peso, dimensiones, contaminación, etc.

1.6 Evolución del transporte de mercancías en núcleos urbanos

El invento más antiguo e importante para el transporte de mercancías fue la rueda. Se trata de un objeto circular que gira alrededor de un eje en su centro. Durante toda la historia ha sido de vital importancia para el transporte, maquinaria, pozos, molinos, etc. Se estima que la rueda fue inventada en el V milenio a.C. en la antigua Mesopotamia. Unido a grandes animales como caballos, burros o bueyes, las ruedas se convirtieron en el medio fundamental de transporte de mercancías durante muchos siglos.

Las vías y carreteras de aquella época fueron modificadas o construidas con el fin de facilitar la circulación al nuevo medio de transporte, los carros. En el imperio romano se construyeron numerosas vías para la conexión de ciudades y asentamientos, con el fin de facilitar y guiar a aquellas personas que tuvieran que viajar teniendo en cuenta que todo el mundo tenía derecho a usarlas, pero el mantenimiento de estas era responsabilidad de los habitantes.

Los carros y las carreteras se fueron desarrollando y mejorando, pero la idea fundamental fue la misma hasta el siglo XVIII con la revolución industrial. Esta transformación tecnológica y social se dio en Gran Bretaña y se fue extendiendo por Europa, concluyendo en 1830. Durante este periodo la economía rural basada en la agricultura y ganadería dio paso a una economía urbana e industrial. Desde este momento, se vivió un auge de las ciudades a la vez que un decrecimiento de los núcleos rurales que ha llegado hasta nuestros días. El invento de la máquina de vapor por James Watt en 1769 supuso un progreso gigantesco en el sector del transporte, potenciándose el ferrocarril. Estas máquinas podían funcionar las 24 horas del día, sin bajar su ritmo como en el caso de los animales. Las vías ferroviarias, las cuales se componían de raíles de madera, crecieron por toda Europa, cambiando la forma de entender el transporte hasta la fecha.

Aún inventado e implementado el ferrocarril, el ser humano siguió innovando en el sector del transporte hasta que, en 1815, Josef Bozek, construyó el primer vehículo propulsado por un motor de petróleo. Pasados los años, el coche se ha convertido en un instrumento casi imprescindible para la vida de las personas, sobre todo en las ciudades. Este medio de transporte sobrepasó al ferrocarril debido a su flexibilidad, capacidad de entregar mercancía en cualquier punto, etc. Dependiendo de la distancia, tráfico, tamaño o volumen de la mercancía, se puede optar por distintos tipos de automóviles como pueden ser los camiones para transportar grandes cantidades, coches para trayectos intermedios, o incluso motos si existe mucha congestión del tráfico en las ciudades (Melero, 2019).

Por otro lado, el vehículo eléctrico se inventó entre 1832 y 1839 por el escocés Robert Anderson. Desde entonces se ha trabajado en la mejora de la pila eléctrica ya que en un primer momento no era recargable. En 1880 se consiguió crear baterías recargables de plomo y ácido gracias a los inventores franceses Camille Faure y Gastón Planté. Lamentablemente, nada tuvo que hacer el vehículo eléctrico cuando, en 1908, Ford presentó su vehículo Model T que, debido a su fabricación en serie, tenía un precio mucho menor a cualquier otro. En la actualidad, impulsado por el objetivo de reducción de emisiones, se está incentivando el desarrollo de esta tecnología y, en un futuro cercano, es probable que se imponga a los vehículos de combustión interna (Murias, 2019).

En España, la evolución del transporte de mercancías siguió el mismo camino que en el resto de Europa. Inicialmente, la producción y el consumo de los bienes era de carácter local y, eventualmente, alguno llegaba por rutas comerciales o barcos si se daban las condiciones. A lo largo de los años, el consumo de bienes traídos del exterior de los núcleos urbanos fue creciendo, mejorando los transportes y las vías por las que circulaban.

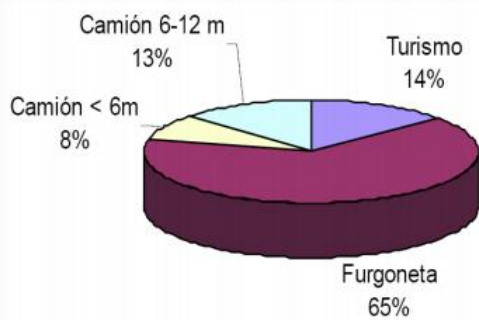
La Revolución Industrial en España se retrasó hasta ya iniciado el siglo XIX, alcanzando su máximo esplendor a mediados del siglo. La primera vía ferroviaria unió Mataró y Barcelona en el año 1848 y, a partir de ese momento, se fueron desarrollando en otras ciudades. Con la llegada del ferrocarril, el transporte de mercancías mejoró en términos de rapidez, eficiencia, seguridad y eficiencia.

La última gran revolución en el sector del transporte de mercancías fue a principios del siglo XX con la producción de automóviles de combustión interna. En España se reformaron las antiguas calzadas y se propuso un sistema radial con Madrid con el centro debido a su gran crecimiento (Hermanos Laredo, 2019). A esta gran revolución se sumaron la del transporte de mercancías por medio marítimo y aéreo.

En la actualidad, en la ciudad de Madrid predominan las empresas logísticas y cadenas comerciales que suelen subcontratar su flota, con vehículos de hasta 3500 kg de MMA debido a las características del reparto y la ciudad. Los vehículos que componen la flota tienen un alto grado de utilización, realizando una media de 20 paradas diarias con un tiempo por parada de 15 minutos de media. Como se ha mencionado anteriormente, las empresas del sector utilizan sistemas para optimizar las rutas, disminuyendo el tiempo total de ellas.

Según los datos de la Distribución Urbana de Mercancías (DUM) el 65% de los vehículos que realizan operaciones de carga y descarga en Madrid son furgonetas. En cuanto a la masa máxima autorizada (MMA), la mayor parte de los vehículos son de menos de 3,5 t, pudiéndose conducir con el permiso de conducción tipo B, el requerido para turismos. En el caso de Loomis, la mayoría de los vehículos blindados son “camiones” de menos de 6 metros con una MMA de entre 3,6 t y 12 t (Ministerio de Fomento, 2016).

Tipología de los vehículos que realizan operaciones de carga y descarga



MMA de los vehículos que realizan operaciones de carga y descarga

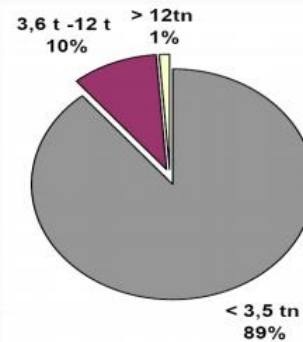
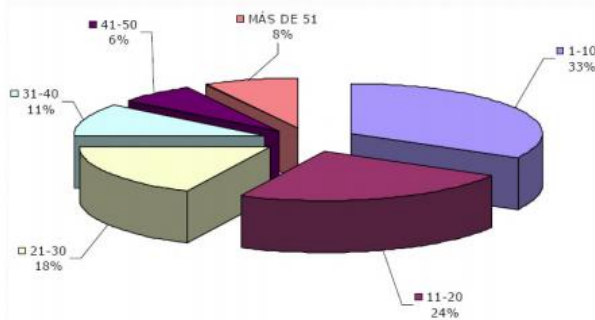


Figura 9: Tipología y MMA de los vehículos que realizan carga y descarga

Con respecto a las paradas que tiene cada empresa de transporte de mercancías, más de la mitad de estas tienen menos de 20 paradas diarias. Otro aspecto importante es el alto grado de utilización en volumen de los vehículos, aprovechando al máximo el espacio del habitáculo para optimizar el proceso. El 41% de los vehículos tiene una ocupación de entre el 76% y el 100% de su capacidad total (Ministerio de Fomento, 2016).

Número de operaciones diarias



Ocupación (en volumen) del vehículo a la salida del almacén

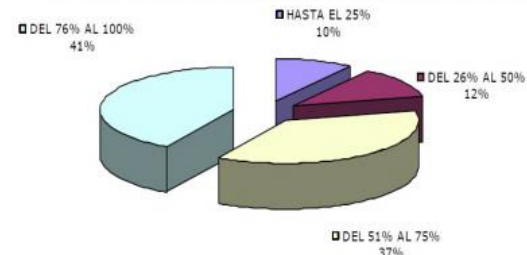


Figura 10: Número de operaciones diarias y ocupación de los vehículos de transporte

En Madrid la mayor parte de la actividad tiene como destinatario comercio u oficinas, aunque cabe destacar el crecimiento de la entrega a domicilio (15%) debido al crecimiento de las nuevas tecnologías (Ministerio de Fomento, 2016). En los próximos años, se prevé que siga creciendo y, la pandemia mundial ha hecho que este proceso se acelere.



Figura 11: Tipo de receptor de las operaciones de carga y descarga

La distribución de mercancías en Madrid se concentra entre las 8 y las 13 horas con más del 50% de las paradas diarias, coincidiendo con las horas donde más congestión de tráfico hay en la capital (Ministerio de Fomento, 2016). Fuera del alcance del trabajo, se podría aplanar la distribución horaria del estacionamiento en carga y descarga fomentando el reparto de mercancías en zonas horarias menos concurridas como por la tarde. Una medida para aplanar la demanda sería abaratar el coste del transporte en estas franjas horarias valle. De esta forma, se reduciría considerablemente la congestión del tráfico en las zonas céntricas de la capital.

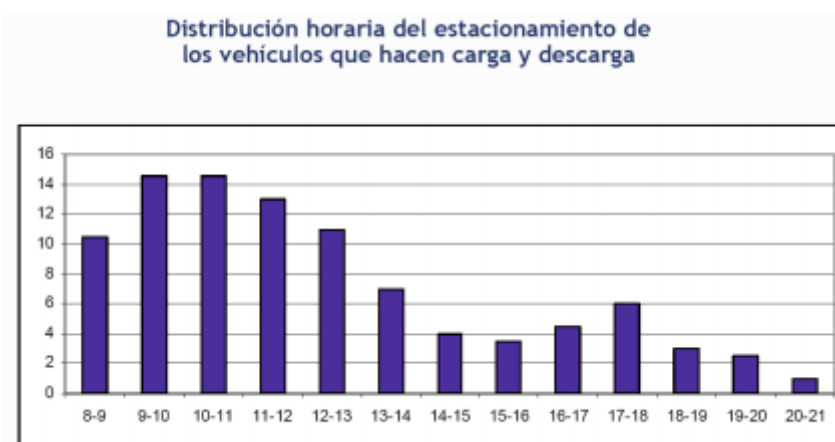


Figura 12: Distribución horaria del estacionamiento en carga y descarga

Uno de los mayores problemas a los que se enfrentan las empresas de transporte de mercancías y el gobierno regional de Madrid es el lugar de estacionamiento durante sus servicios. Más de un 75% de las paradas en la ciudad cometen algún tipo de indisciplina como el estacionamiento en doble fila, en carril bus o en los pasos de peatones (Ministerio de Fomento, 2016).

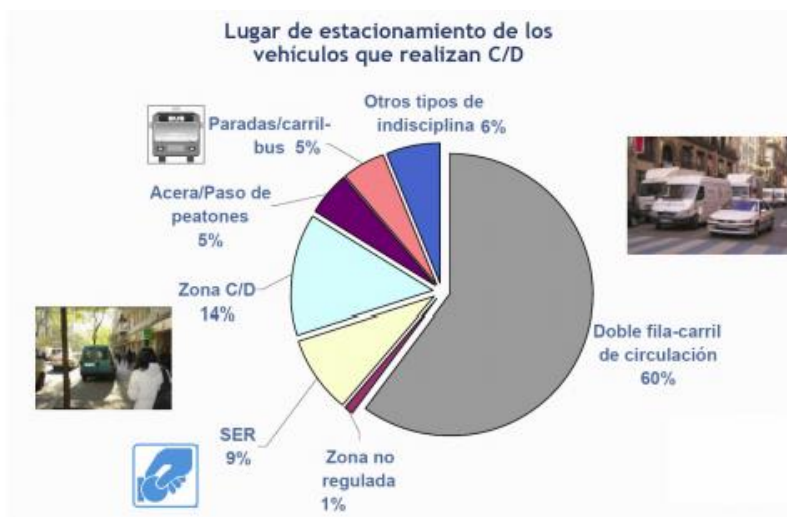


Figura 13: Lugar de estacionamiento de los vehículos de carga y descarga

Para ayudar a las empresas de carga y descarga y a la gestión del tráfico en Madrid, existen zonas destinadas para el uso, restringidas a paradas de carga y descarga durante un horario determinado. Con esta iniciativa se pretende reducir el tiempo de búsqueda de aparcamiento y las paradas en doble fila que causan un gran problema para el tráfico. El número de zonas reservadas ha ido incrementando año tras año como se observa en el siguiente gráfico, aumentando su uso y disminuyendo las paradas en doble fila (Ministerio de Fomento, 2016).

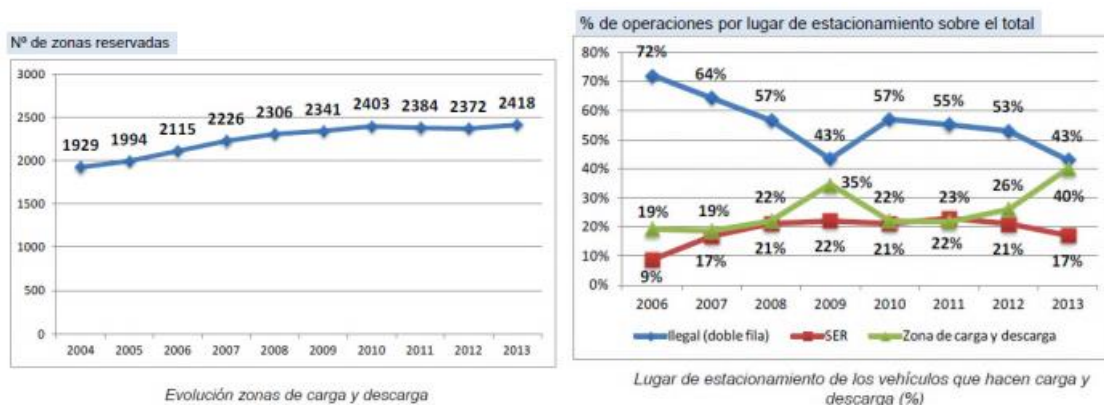


Figura 14: Zonas reservadas para carga y descarga

Por otro lado, se observa que la densidad de paradas es mayor en la zona central de la capital, debido a la alta densidad de viviendas, comercios y oficinas (Ministerio de Fomento, 2016). Debido a esta densidad de vehículos de transporte de mercancía, son las empresas la que contribuye y sufren las consecuencias de la congestión del tráfico.



Ilustración 6: Densidad de paradas de carga y descarga en la ciudad de Madrid

1.7 Optimización del proceso de electrificación de una flota comercial

Existen varios proyectos a nivel europeo con la idea de ayudar a las empresas a electrificar su flota. Uno de ellos es EUFAL, una plataforma que trabaja en 5 países para desarrollar una herramienta con numerosa información acerca de este tema. Ayuda a empresas europeas a implementar los vehículos eléctricos en su flota mediante un software (Fleet Mix Analyser) de evaluación de escenarios conviviendo vehículos convencionales y eléctricos. Además, cuenta con herramientas para calcular el TCO (Total Cost of Ownership) y realizar comparativas entre las distintas opciones disponibles para la empresa.

Otra de estas iniciativas a nivel europeo es el programa FREVUE, la cual intentó construir acuerdos entre ayuntamientos y empresas del sector del transporte. El objetivo de la organización es hacer ver que los vehículos eléctricos son una alternativa viable a los vehículos convencionales actuales, haciendo ver los beneficios económicos y medioambientales de esta opción. Entre sus colaboradores se encuentran ayuntamientos como el de Ámsterdam, Oslo, Milán, Lisboa y Estocolmo; empresas internacionales como Nissan, Heineken, TNT y UPS; y empresas españolas como SEUR o la EMT.

Respecto al proyecto de FREVUE, un grupo de investigadores de la Universidad de La Rioja, analizó sus resultados con empresas españolas para desarrollar una herramienta de gestión de flotas de vehículos eléctricos. Este instrumento permite monitorizar los parámetros más importantes de los vehículos para evaluar la eficiencia de las operaciones

y los costes y beneficios de esta tecnología (León Bello, González Viosca, Díaz Marqués, & Solir Castillo, 2016).

Por otro lado, el artículo “A portfolio approach for optimal fleet replacement toward a sustainable urban freight transportation” muestra las ecuaciones más importantes para el estudio de la renovación de flotas (Ahani & Melo, 2016). Además, utiliza el software Matlab para crear una herramienta capaz de optimizar su estudio. El resultado muestra cómo se ha de cambiar la flota y qué tipo de vehículo es el que habría que incorporar (diésel o eléctrico).

Otros estudios relacionados con este proyecto serían los siguientes:

- Estudio de la electrificabilidad urbana (Álvaro Hermana, 2017)
- Viabilidad técnica, ambiental y sostenible del vehículo eléctrico (Cestau Cubero, 2014)
- Optimización sostenible y gestión eficiente de flotas urbanas (Grosso de la Vega, 2017)

1.8 Conclusión

La contaminación medioambiental a la que hacemos frente en la actualidad es uno de los mayores problemas que tiene el mundo actualmente. La gran cantidad de partículas contaminantes emitidas a la atmósfera hacen que nos situemos en niveles críticos para la salud de la población y la del planeta.

Con acuerdos internacionales, los gobiernos pretenden reducir drásticamente la emisión de partículas contaminantes. A través de restricciones, impuestos y limitaciones, se fomentan aquellas tecnologías que hacen reducir las emisiones de partículas contaminantes. Uno de los sectores que más emisiones produce es el transporte, causante del 16,2% de ellas.

Como es de suponer, las zonas donde se emiten más partículas contaminantes son los núcleos urbanos. Las ciudades no han dejado de crecer en el último siglo, concentrando la mayor parte de industrias, servicios y población en un área reducida. Debido a esta alta densidad, las ciudades producen alrededor del 75% de las emisiones anuales a la atmósfera, por lo que la mayoría de las restricciones afectan a los núcleos urbanos.

El objetivo del 2030, según el acuerdo de París, obliga a las empresas a reducir sus emisiones de CO₂ un 55% respecto a las que generaban en 1990. Debido a la urgencia de este cambio en las flotas y la etapa en la que se encuentran las nuevas tecnologías, las empresas de transporte se ven envueltas en una situación de incertidumbre a la que deberán enfrentarse en los próximos años.

2 Metodología

2.1 Introducción

A lo largo de este capítulo se expone la metodología que se ha ideado en este proyecto con el fin de desarrollar una herramienta capaz de planificar de manera realista la renovación de la flota de una empresa de una forma óptima. Además, se explicará cómo esta metodología ha dado paso, mediante un software de programación, a una herramienta real manejable para cualquier empresa y tipo de flota.

2.2 Nomenclatura

2.2.1 Índices

Tabla 12: Nomenclatura de los índices usados en la metodología

Nomenclatura	Descripción
F	número de vehículos en la flota actual
NA	número de vehículos alquilados que van a ser reemplazados
NC	número de vehículos comprados que van a ser reemplazados
NM	número de vehículos en el mercado
RMX	número de rutas que tiene la empresa
TFC	tamaño de la flota de vehículos comprados
TMX	número de tamaños de vehículos que tiene la empresa
TS	año máximo del estudio

2.2.2 Parámetros

2.2.2.1 Generales

Tabla 13: Nomenclatura de los parámetros generales usados en la metodología

Nomenclatura	Descripción
AM	año de matriculación de los vehículos de la flota
EL	emisiones por litro
EM	edad media de la flota
EMV	edad media según un tamaño y un tipo de ruta concreto
I	Identificador de los vehículos de la flota
K	distancia en un año de los vehículos de la flota
KA	kilómetros acumulados de los vehículos de la flota
KM	kilómetros medio anual
KMV	kilómetros medio anual por tipo de ruta y tamaño del vehículo
MA	marcas de los vehículos en el mercado
MO	modelos de los vehículos en el mercado

OR	objetivo de reducción de emisiones
PS	variable binaria que indica 1 (vehículo comprado) o 2 (vehículo alquilado)
R	tipos de rutas en la empresa
RF	tipo de ruta de los vehículos de la flota
RM	tipo de ruta de los vehículos en el mercado
T	tipos de tamaños en la empresa
TA	año en el que se realiza el estudio
TAM	tiempo alquiler máximo
TF	tamaño de los vehículos de la flota
TG	tecnología de los vehículos en el mercado
TM	tamaño de los vehículos en el mercado

2.2.2.2 Económicos

Tabla 14: Nomenclatura de los parámetros económicos usados en la metodología

Nomenclatura	Descripción
A	amortización de los vehículos del mercado
AC	si cada vehículo de la flota es en propiedad o alquilado
ACM	alquiler o en propiedad de los vehículos del mercado
CA	otros costes anuales de los vehículos en el mercado
CD	consumo de diésel de los vehículos del mercado
CE	consumo de electricidad de los vehículos en el mercado
CF	consumo de la flota
CI	otros costes de inversión de los vehículos en el mercado
IC	coste de impuesto de circulación de los vehículos en el mercado
IM	porcentaje de impuestos del país
IPC	IPC
L	litros de diésel en un año de los vehículos de la flota
MN	coste de mantenimiento de los vehículos en el mercado
PC	precio de compra de los vehículos en el mercado
PD	precio del diésel
PE	precio electricidad
PEM	precio de las emisiones
PJ	coste de peajes de los vehículos en el mercado
RE	tasa de retorno
S	subsidio de los vehículos del mercado
SG	coste de seguro de los vehículos en el mercado
VR	valor residual de los vehículos en el mercado

2.2.2.3 De reemplazo

Tabla 15: Nomenclatura de los parámetros de reemplazo usados en la metodología

Nomenclatura	Descripción
CRD	coeficiente de la distancia en el cálculo de los vehículos reemplazados
CRE	coeficiente de la edad en el cálculo de los vehículos reemplazados
DAM	kilómetros alquiler máximo
IDN	identificadores de los vehículos que se van a incorporar
TR	tasa de reemplazo

2.2.3 Variables

2.2.3.1 Generales

Tabla 16: Nomenclatura de las variables generales usadas en la metodología

Nomenclatura	Descripción
cm	contador de vehículos en el mercado con un tamaño y un tipo de ruta concreto
cn	contador de vehículos en la flota con un tamaño y un tipo de ruta concreto
ef	emisiones de los vehículos de la flota
em	emisiones de los vehículos en el mercado
ered	emisiones de los vehículos que se van a retirar cada año

2.2.3.2 Económicas

Tabla 17: Nomenclatura de las variables económicas usadas en la metodología

Nomenclatura	Descripción
ac	qué tipo de vehículo es el reemplazado: en propiedad o alquiler
am	datos finales de los vehículos en el mercado
cf	cashflow del vehículo del mercado
cr	coste real de los vehículos incorporados de la iteración del estudio
cra	coste real de la opción de vehículos cada año
crt	coste real de la opción de vehículos cada año
cs	coste sombra de los vehículos incorporados de la iteración del estudio
csa	coste sombra de la opción de vehículos cada año
cst	coste sombra de la opción de vehículos del estudio
de	depreciación del vehículo en el mercado
gl	consumo de los vehículos en el mercado
im	impuestos del vehículo del mercado en un año concreto de su compra
l	precio sombra de las emisiones
mdv	media de npv de los vehículos diésel del mercado con un determinado tamaño y ruta

mev	media de npv de los vehículos eléctricos del mercado con un determinado tamaño y ruta
npv	net present value del vehículo en el mercado en un año concreto
npvo	net present value optimo del estudio
pe	precio de las emisiones de los vehículos en el mercado
pra	precio del vehículo en el mercado antes de impuestos
prd	precio del vehículo en el mercado después de impuestos
sp	porcentaje del subsidio que reciben al adquirir un vehículo eléctrico

2.2.3.3 De reemplazo

Tabla 18: Nomenclatura de las variables de reemplazo usadas en la metodología

Nomenclatura	Descripción
c	coeficiente de cada vehículo de la flota actual para ser reemplazado
ca	variable binaria (0,1) que establece si un vehículo de la flota se ha de cambiar
e	edad de un vehículo
inc	identificador vehículos reemplazados
ira	identificador de los vehículos alquilados que se van a reemplazar
irc	identificador de los vehículos comprados que se van a reemplazar
po	posición de los vehículos que se van a reemplazar
rr	tipo de ruta del vehículo reemplazado
tnc	tamaño de los vehículos reemplazados

2.2.3.4 De optimización

Tabla 19: Nomenclatura de las variables de optimización usadas en la metodología

Nomenclatura	Descripción
eft	emisiones totales de la flota para cada año de la opción estudiada
eo	emisiones totales del estudio de la solución optima
er	emisiones de los vehículos incorporados de la iteración del estudio
era	emisiones de la opción de vehículos cada año
ert	emisiones de la opción de vehículos del estudio
iin	identificadores de los vehículos incorporados a la flota
io	identificadores de los vehículos que se incorporan en la solución óptima
ite	iteraciones de la optimización del estudio
mop	modo optimo
mre	modo reducción
ok	se ha conseguido el objetivo de reducción de emisiones
rmax	reducción máxima de emisiones si todos los vehículos son eléctricos

ro	reducción de emisiones de la solución óptima
rt	reducción total de emisiones de la opción del estudio
vi	vehículos incorporados de la opción
via	vehículos incorporados de la opción cada año
vit	vehículos incorporados de la opción durante todo el estudio

2.3 Diagrama de flujos

2.3.1 Diagrama de bloques

La metodología del proyecto se puede dividir en cinco áreas:

La primera de ellas es la lectura de los datos y parámetros. El usuario que utilice la herramienta debe introducir los datos requeridos al programa. Con el fin de facilitar el uso de la herramienta y que esta pueda ser usada por cualquier persona en la empresa, la información requerida será leída por la herramienta a través de un fichero Excel.

La segunda área es el análisis económico de los vehículos candidatos a incorporarse a la flota. Con el fin de hallar el “cost of ownership” total del estudio, se realiza un análisis económico de cada uno de los vehículos basado en un flujo de caja, donde se obtendrá el NPV. Este estudio se realizará para cada vehículo del mercado y cada año del estudio, ya que en cada uno tendrá unos resultados diferentes debido a la evolución de distintos precios.

Posteriormente, la herramienta toma la decisión de qué vehículos deben retirarse de la flota cada año. La elección se realiza de dos formas distintas dependiendo si son vehículos en alquiler o en propiedad. Para el primero, se cambiará el vehículo cuando acabe el contrato de alquiler. Para el segundo, se calcula un coeficiente en base a los kilómetros acumulados y edad de cada vehículo, priorizando el retiro de los vehículos con mayor coeficiente.

El proceso más importante del proyecto es la optimización de los vehículos que se han de incorporar a la flota. Para ello se hace uso de un precio sombra para las emisiones de estos vehículos, con el fin de minimizar el “cost of ownership” del estudio siempre y cuando se cumplan con la reducción de emisiones requerida por el usuario.

Por último, la herramienta escribe los resultados de la optimización del estudio en un fichero Excel. El usuario puede seleccionar qué informes le interesan con el fin de generar solo aquellos que le vayan a aportar una información deseada.

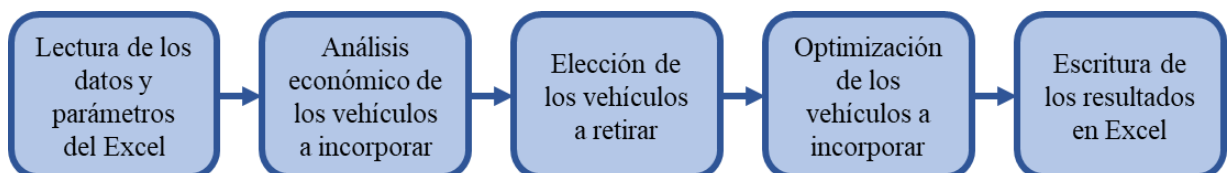


Ilustración 7: Diagrama de bloques de la metodología

2.3.2 Análisis económico

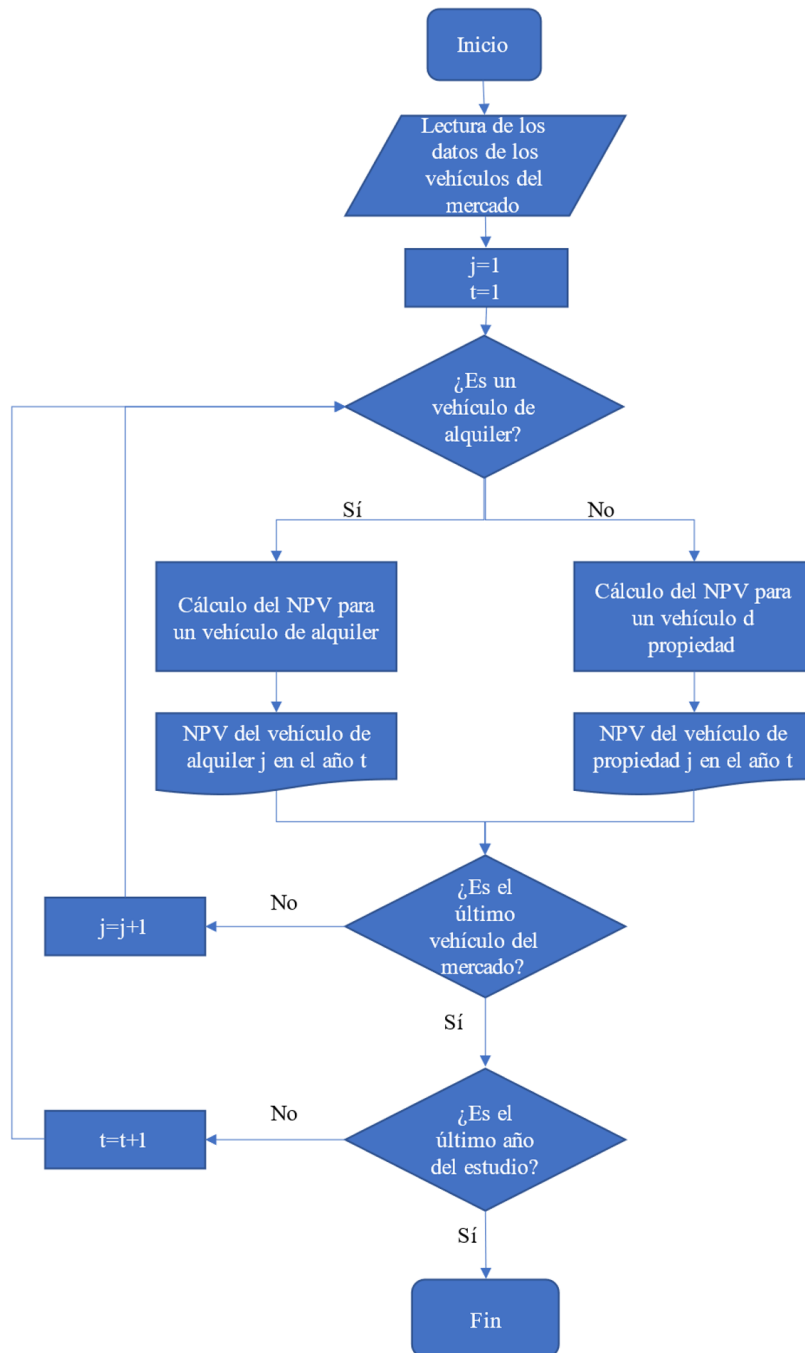


Ilustración 8: Diagrama de flujo del análisis económico

2.3.3 Cálculo de los subsidios

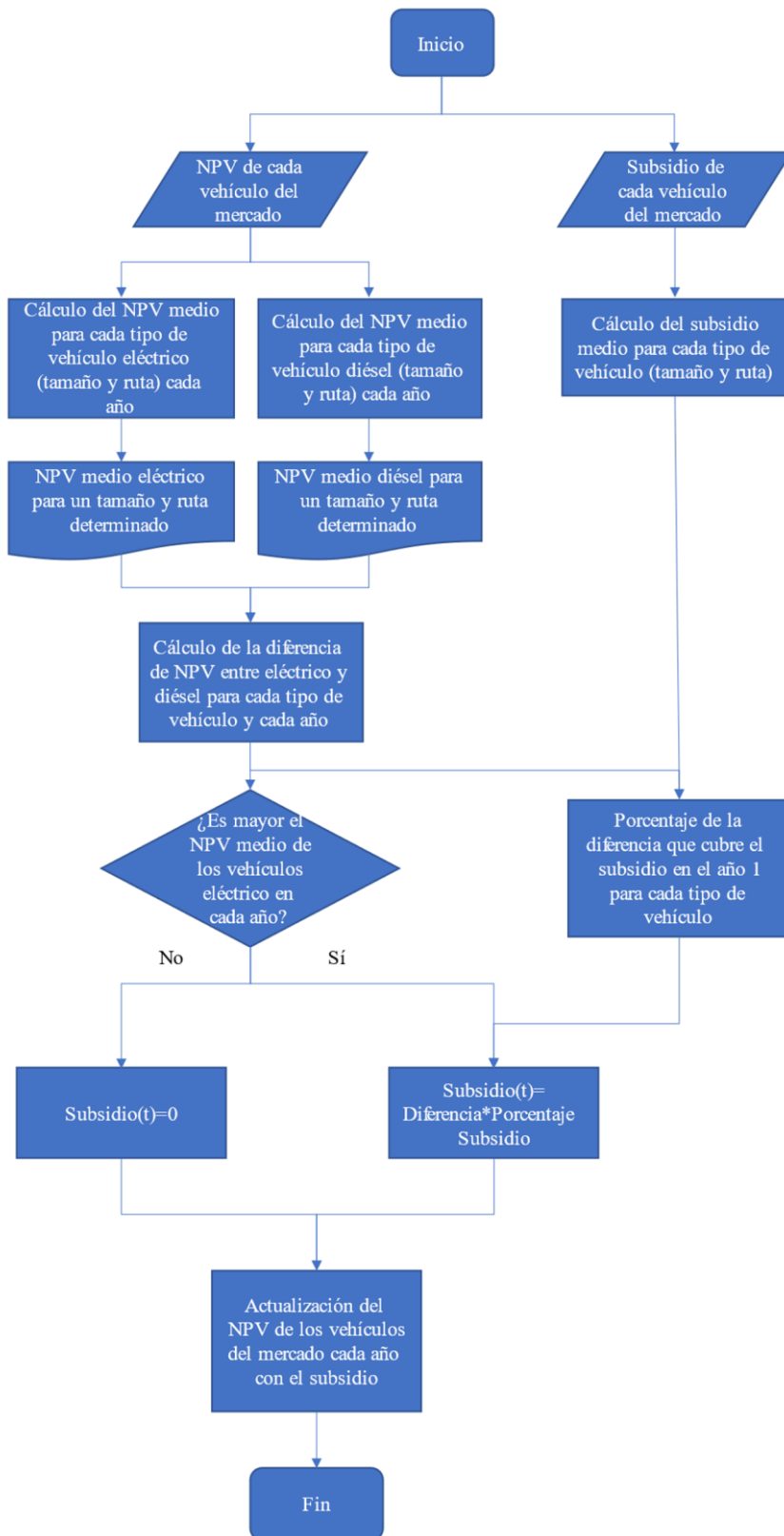


Ilustración 9; Diagrama de flujo del cálculo de subsidios

2.3.4 Selección de vehículos a reemplazar

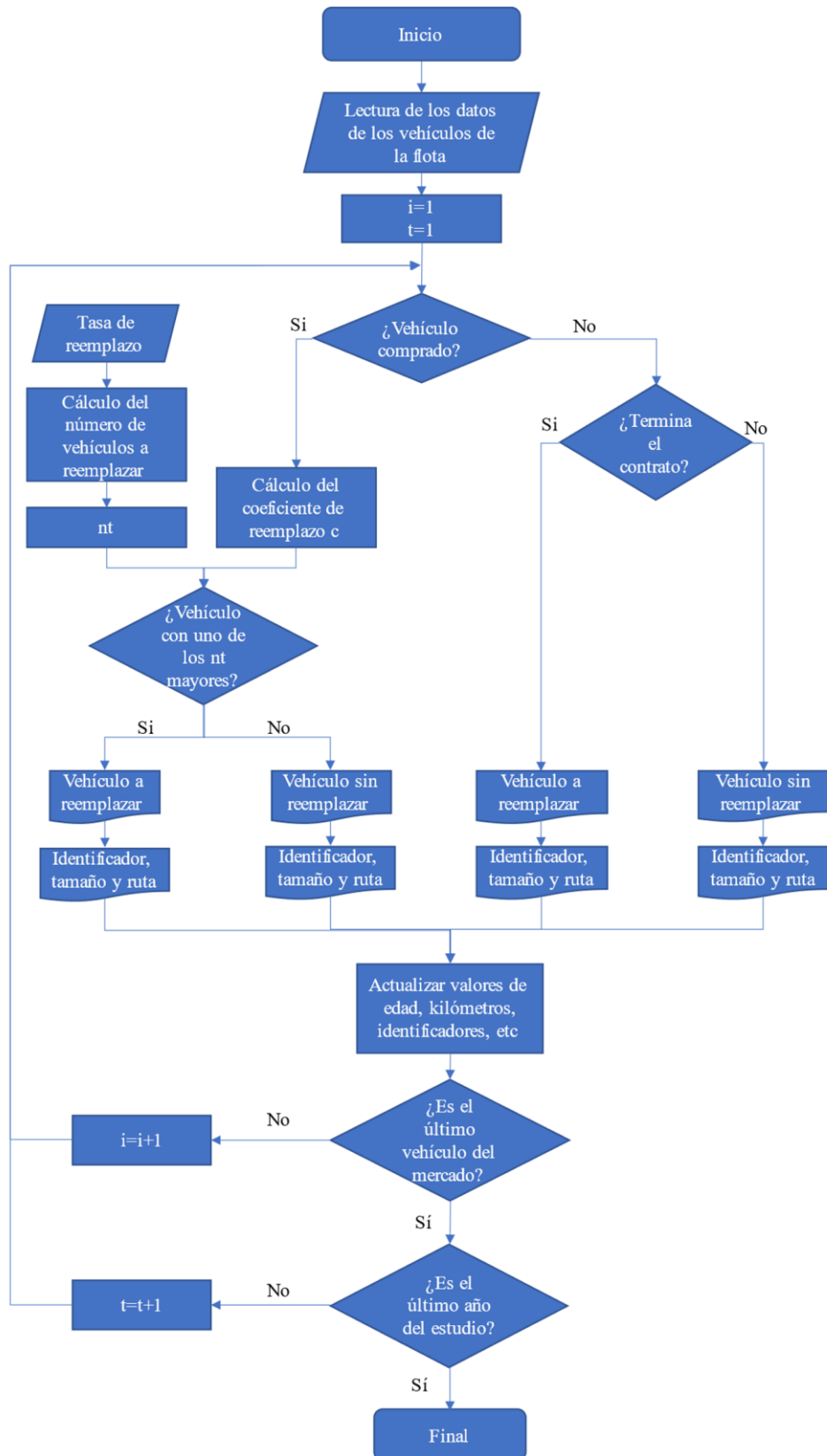


Ilustración 10: Diagrama del flujo de la elección de los vehículos a retirar

2.3.5 Optimización de los vehículos a incorporar

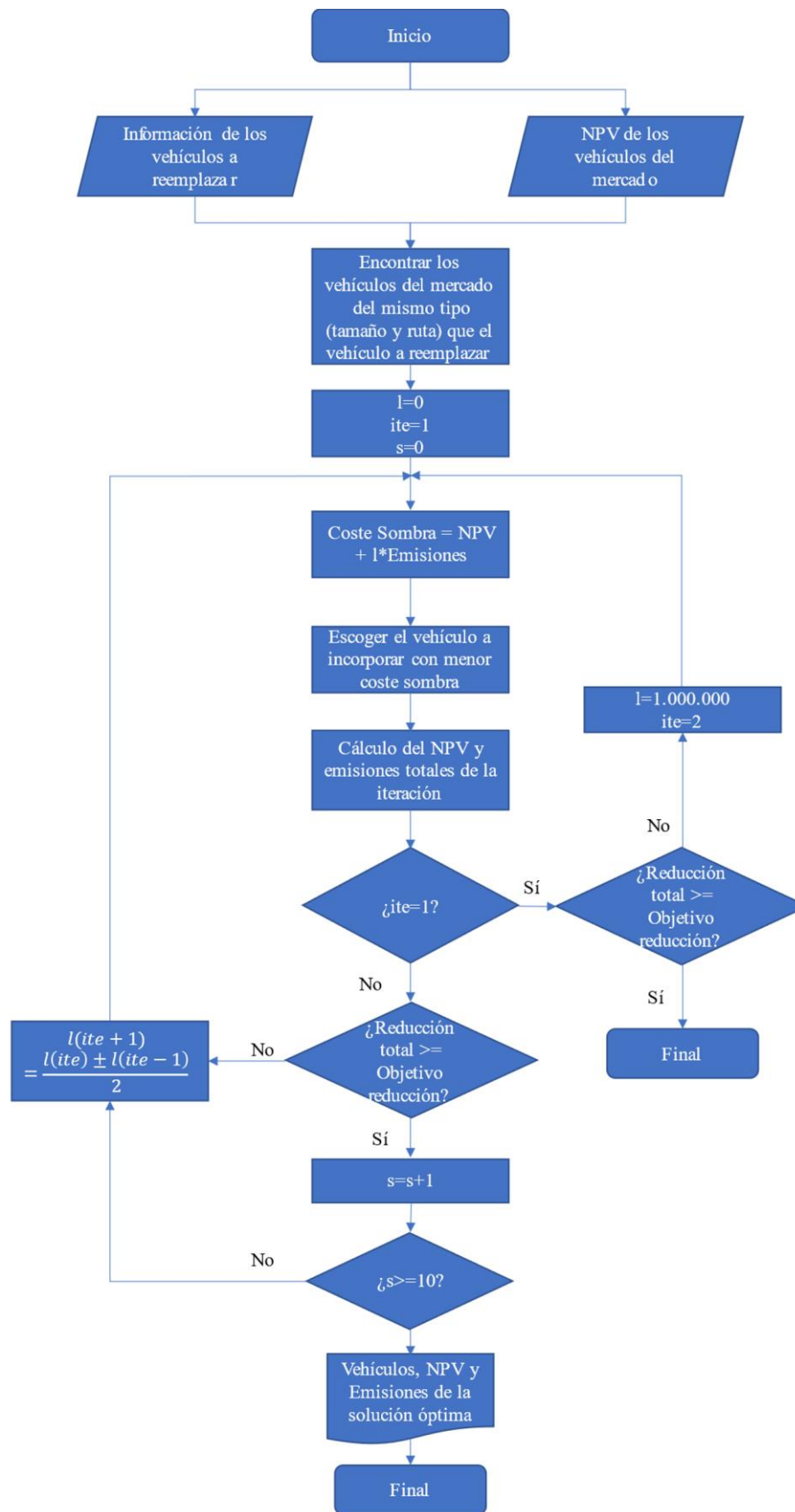


Ilustración 11: Diagrama de flujo de la optimización de los vehículos a incorporar

2.4 Desarrollo conceptual

El programa empieza borrando los datos de variables de la última simulación. Posteriormente, el programa lee los datos introducidos por el usuario en el fichero “Fleet Electrification Information”.

En primer lugar, el programa calcula los kilómetros y la edad media de los vehículos según el tamaño y el tipo de ruta en el que se encuentren. Estos datos serán utilizados posteriormente para calcular los coeficientes de reemplazo y aumentar los kilómetros año tras año.

$$e(1, i) = TA - AM(1, i)$$

$$KMV(j, k) = \frac{\sum_{i=1}^{SZ} K(1, i)}{cn(j, k)}$$

$$EMV(j, k) = \frac{\sum_{i=1}^{SZ} e(1, i)}{cn(j, k)}$$

Siendo e la edad de cada vehículo, TA el año actual del estudio, AM el año de matriculación de cada vehículo. Por otro lado, KMV y EMV son los kilómetros acumulados y la edad media de cada una de las categorías, mientras que K son los kilómetros acumulados de cada vehículo y cn el contador de vehículos de cada categoría.

Utilizando los kilómetros y edad media de la flota según el tipo de vehículo que sean (tamaño y ruta), se consigue que el coeficiente de reemplazo calculado sea respecto a la media de ese tipo de vehículos y no a la total. Esto se debe a que no es posible comparar un turismo con un vehículo de 10 toneladas en cuanto a su vida útil y los kilómetros que puede recorrer a lo largo de su vida. Debido a esto, también es necesario tener en cuenta esto a la hora de actualizar los kilómetros de un determinado vehículo, ya que el criterio es diferente según se trate de un vehículo pequeño de uno grande.

2.4.1 Análisis económico de los vehículos del mercado

Posteriormente, la herramienta calcula el NPV o “total cost of ownership” de cada uno de los vehículos del mercado, que son los candidatos para incorporarse a la flota. Para ello, se tienen en cuenta varios costes y factores que se describen a continuación:

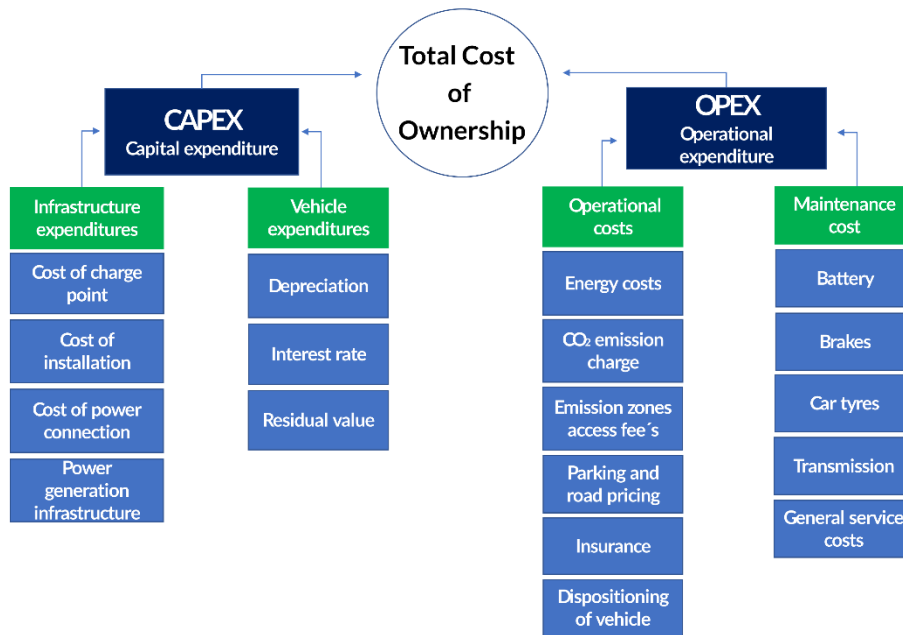


Ilustración 12: Total Cost of Ownership

El análisis de los vehículos comprados se realiza basado en un flujo de caja, como la tabla que se muestra a continuación.

Tabla 20: Flujo de caja del análisis económico de los vehículos del mercado

Años	0	1	2	3	4	5	6	7
Amortización		-15,714	-15,934	-16,157	-16,384	-16,613	-16,846	-17,081
Mantenimiento		-200	-203	-206	-209	-211	-214	-217
Seguro		-1,000	-1,014	-1,028	-1,043	-1,057	-1,072	-1,087
Tasas circulación		-50	-51	-51	-52	-53	-54	-54
Peajes		0	0	0	0	0	0	0
Valor residual								1,200
Combustible		-1,513.35 €	-1,534.53 €	-1,556.02 €	-1,577.80 €	-1,599.89 €	-1,622.29 €	-1,645.00 €
Emisiones		0.00 €	0.00 €	0	0.00 €	0.00 €	0	0.00 €
Resultado antes de impuestos	0	-18,478	-18,736	-18,999	-19,265	-19,534	-19,808	-18,885
Impuestos	0	3,880	3,935	3,990	4,046	4,102	4,160	3,966
Resultado después de impuestos	0	-14,597	-14,802	-15,009	-15,219	-15,432	-15,648	-14,919
Amortización		15,714	15,934	16,157	16,384	16,613	16,846	17,081
Change Working Capital								
Change Storage								
Change Account Receivables								
Change Trade Creditors								
Change Loan								
Inversiones								
Compra del coche	-110,000							
Infraestructura de carga	-3,000							
Ayudas o incentivos	5,000							
Cash Flow	-108,000	1,117	1,133	1,148	1,165	1,181	1,197	2,162

El estudio económico se realiza para cada vehículo y para cada año en el que puede ser comprado. En el caso de los vehículos diésel, el valor de adquisición se mantiene constante a lo largo de los años. En el caso de los vehículos eléctricos, se supone un decrecimiento del valor de adquisición proporcional a la predicción de abaratamiento de

Metodología

las baterías de litio, componente que representa el 35% del coste del vehículo. Así pues, la ecuación para el cálculo del valor de adquisición de los vehículos eléctricos cada año es la siguiente:

$$PC(ano + 1, i) = PC(ano, i) * (1 - 0.2148 * (t - 2009)^{-0.813})$$

Siendo PC el precio de adquisición de cada vehículo del mercado y t el año en el que se encuentra la simulación.

Esta formulación viene de la predicción de evolución del precio de las baterías de litio, utilizadas en vehículos eléctricos. BloombergNEF publica cada año la predicción de la evolución de este tipo de baterías, predicciones que resultan muy fiables.

La revista ha publicado que se espera que para el 2023 se alcance la barrera de los 100\$/kWh, punto en el que se sitúa la paridad entre los vehículos diésel y eléctrico. Esto quiere decir que en 2023 el cost of ownership de un vehículo eléctrico y uno diésel debería de ser el mismo. También se ha publicado que para el 2030, fecha muy señalada para cumplir objetivos medioambientales, el precio de las baterías ronde los 58\$/kWh.

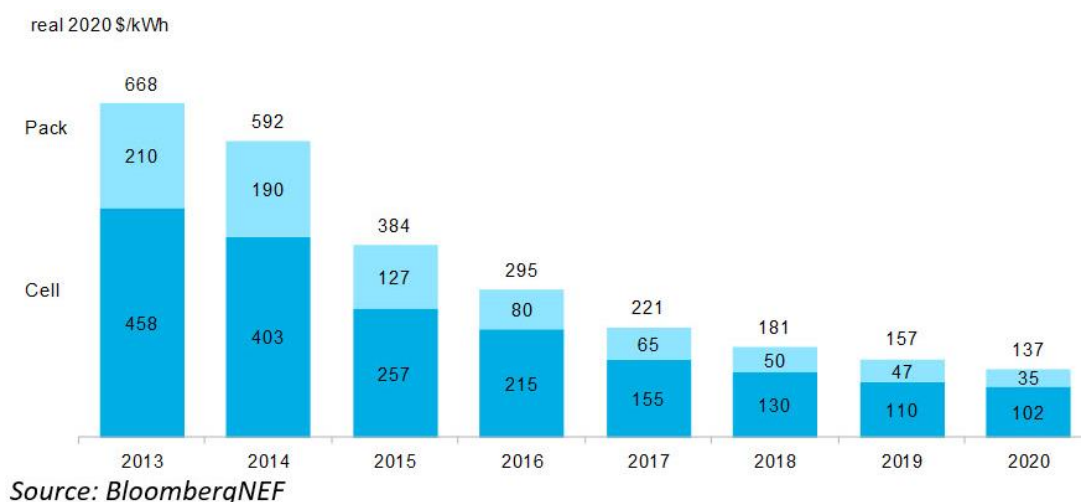


Figura 15: Evolución del precio de las baterías de litio

Tabla 21: Evolución del precio de los vehículos eléctricos

Año	Coste batería Ión-Litio (\$/kWh)	Cambio Dólar-Euro Coste (€/kWh)	Reducción	Línea Tendencia	Reducción Coste Baterías	Reducción Coste Total Vehículo	0,84
2010	\$ 1.183,00	993,72 €		1.698,80 €	0,00%	0,00%	
2011	\$ 917,00	770,28 €	-22,49%	811,42 €	-52,24%	-18,28%	18,28%
2012	\$ 721,00	605,64 €	-21,37%	526,66 €	-35,09%	-12,28%	12,28%
2013	\$ 668,00	561,12 €	-7,35%	387,57 €	-26,41%	-9,24%	9,24%
2014	\$ 592,00	497,28 €	-11,38%	305,52 €	-21,17%	-7,41%	7,41%
2015	\$ 384,00	322,56 €	-35,14%	251,56 €	-17,66%	-6,18%	6,18%
2016	\$ 295,00	247,80 €	-23,18%	213,44 €	-15,15%	-5,30%	5,30%
2017	\$ 221,00	185,64 €	-25,08%	185,12 €	-13,27%	-4,64%	4,64%
2018	\$ 181,00	152,04 €	-18,10%	163,28 €	-11,80%	-4,13%	4,13%
2019	\$ 157,00	131,88 €	-13,26%	145,93 €	-10,62%	-3,72%	3,72%
2020	\$ 137,00	115,08 €	-12,74%	131,83 €	-9,66%	-3,38%	3,38%
2021				120,15 €	-8,86%	-3,10%	3,10%
2022				110,33 €	-8,18%	-2,86%	2,86%
2023	\$ 101,00	84,84 €	-26,28%	101,95 €	-7,60%	-2,66%	2,66%
2024				94,72 €	-7,09%	-2,48%	2,48%
2025				88,42 €	-6,65%	-2,33%	2,33%
2026				82,89 €	-6,26%	-2,19%	2,19%
2027				77,99 €	-5,91%	-2,07%	2,07%
2028				73,62 €	-5,60%	-1,96%	1,96%
2029				69,70 €	-5,32%	-1,86%	1,86%
2030	\$ 58,00	48,72 €	-42,57%	66,17 €	-5,07%	-1,77%	1,77%

Siguiendo la línea de tendencia de los precios de las baterías de litio, se puede observar cómo, a medida que pasa el tiempo, el precio se va estabilizando. Este componente de los vehículos eléctricos representa aproximadamente un 35% del coste total del vehículo. Teniendo en cuenta este dato, se puede predecir como disminuirá el precio de los vehículos de esta tecnología, teniendo presente que el resto de los componentes del automóvil no varían su precio.

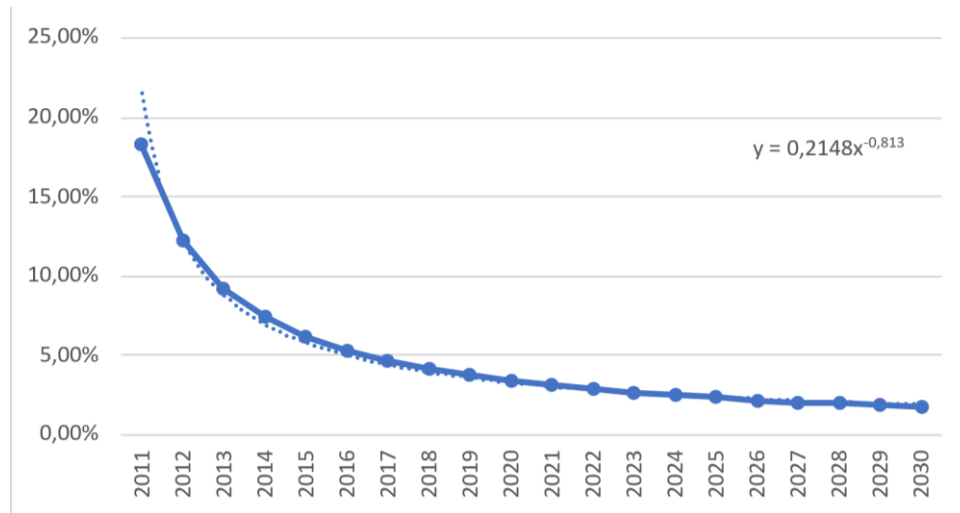


Figura 16: Evolución del precio de los vehículos eléctricos

Para los vehículos de renting o alquiler, el precio se calcula mediante la cuota mensual y los años que va a durar el contrato de alquiler, en lugar de hacerlo con la amortización de la compra del vehículo.

El análisis económico de los vehículos comprados se realiza en el periodo de amortización introducido por el usuario. Este periodo puede ser distinto según el tipo de vehículo. Hay empresas de transporte que tienen periodos de amortización distintos según el tipo de vehículo que se adquiera. Por ejemplo, un turismo podría ser amortizado en 5 años, mientras que un vehículo de 10 toneladas sería amortizado en un periodo de 8 años, debido a su vida útil y gran inversión.

El tercer subíndice indica el año de estudio de la amortización, mientras que el primer subíndice es el año donde se incorporaría el vehículo. Por eso el 1 significa el año de la inversión, que corresponderá con el año t .

El año de la inversión solo se tiene como gastos el precio de adquisición del vehículo, así como otros costes de inversión tales como la infraestructura de carga.

$$\begin{aligned}
 de(t, i, 1) &= 0 \\
 pra(t, i, 1) &= 0 \\
 im(t, i, 1) &= 0 \\
 prd(t, i, 1) &= 0 \\
 cf(t, i, 1) &= -PC(t, i) - CI(1, i)
 \end{aligned}$$

Siendo de de la depreciación, pra el precio antes de impuestos, im los impuestos, prd el precio después de impuestos y cf el cashflow de cada año y vehículo del mercado.

El 2 significa el primer año de amortización. Para el cálculo del cash flow para los siguientes años se tiene en cuenta la depreciación del vehículo, calculada como el precio del vehículo dividido por el periodo de amortización de ese vehículo.

$$de(t, i, 2) = \frac{PC(t, i)}{A(t, i)}$$

Siendo de la depreciación, PC el precio de adquisición y A el periodo de amortización del mismo.

Para calcular el precio antes de impuestos se tienen en cuenta distintos costes derivados del uso del vehículo tales como el mantenimiento, seguro, impuestos de circulación, peajes, combustible (diésel o electricidad) y precio de las emisiones, así como otros gastos anuales que pueda tener el vehículo. El precio antes de impuestos es el gasto total anual del vehículo incluyendo todos los costes derivados de las partidas anteriores. Después, se le aplicarán los impuestos correspondientes de cada país para poder obtener el precio después de impuestos.

$$pra(t, i, 2) = -(de(t, i, k) + MN(1, i) + SG(1, i) + IC(1, i) + PJ(1, i) + gl(1, i) + pe(1, i) + CA(1, i))$$

Siendo MN el mantenimiento, SG el seguro, IC los impuestos de circulación, PJ los peajes, gl el combustible, pe el precio de las emisiones y CA otros costes anuales de cada vehículo.

Para el cálculo de los demás años de amortización, se tiene en cuenta una inflación constante que afectará a todos los gastos relacionados con el vehículo.

$$\begin{aligned} de(t, i, k) &= de(t, i, k - 1) * (1 + IPC) \\ pra(t, i, k) &= pra(t, i, k - 1) * (1 + IPC) \\ im(t, i, k) &= -pra(t, i, k) * IM \end{aligned}$$

$$prd(t, i, k) = pra(t, i, k) + im(t, i, k)$$

Una vez calculado el precio después de impuestos, para el cálculo del cash flow solo debemos añadirle la amortización anual al precio anterior.

$$cf(t, i, k) = prd(t, i, k) + de(t, i, k)$$

En el caso del último año de amortización se tiene en cuenta el valor residual del vehículo.

$$cf(t, i, k) = prd(t, i, k) + de(t, i, k) + VR(1, i)$$

Para los vehículos de alquiler el proceso cambia mínimamente. Al igual que para un vehículo comprado, el año 1 de amortización es el año de inversión, por lo que el cash flow se compone de los costes de inversión del vehículo, en este caso, al no ser comprado, solo costes como la infraestructura de carga.

$$\begin{aligned} cf(t, i, 1) &= -CI(1, i) \\ pra(t, i, 1) &= 0 \\ im(t, i, 1) &= 0 \\ prd(t, i, 1) &= 0 \end{aligned}$$

Siendo de la depreciación, para el precio antes de impuestos, im los impuestos, prd el precio después de impuestos, cf el cashflow y VR el valor residual de cada año y vehículo del mercado.

Para otros años del estudio, se tiene en cuenta la cuota mensual del alquiler del vehículo, así como otros gastos anteriormente mencionados. Cabe destacar que en muchos casos el mantenimiento o seguro del vehículo ya están incluidos en el contrato. En estos casos, se pondría la cuota mensual que se paga y, en los siguientes campos, se dejarían a 0.

$$pra(t, i, 2) = -(cuotamensual(t, i) * 12 + MN(1, i) + SG(1, i) + IC(1, i) + PJ(1, i) + gl(1, i) + pe(1, i) + CA(1, i))$$

$$pra(t, i, k) = pra(t, i, k - 1) * (1 + IPC)$$

$$im(t, i, k) = -pra(t, i, k) * sp$$

$$prd(t, i, k) = pra(t, i, k) + im(t, i, k)$$

$$cf(t, i, k) = prd(t, i, k)$$

Siendo de la depreciación, para el precio antes de impuestos, im los impuestos, prd el precio después de impuestos, cf el cashflow y VR el valor residual de cada año y vehículo del mercado.

Para calcular el NPV (Net Present Value) de los vehículos del mercado, utilizaremos la siguiente fórmula, haciendo uso de la tasa de retorno (RE) introducida por el usuario.

$$npv(t, i) = \sum_{k=2}^{A+1} \frac{cf(t, i, k)}{(1 + RE)^A} - cf(t, i, 1)$$

Siendo npv el net present value de cada vehículo, cf el cash flow de cada vehículo cada año, RE la tasa de retorno y A el periodo de amortización.

Cabe destacar que se tiene en cuenta el precio ficticio que supone para la empresa la emisión de partículas contaminantes. Este coste penaliza a los vehículos más contaminantes. Aunque no es un valor visible, corresponde a distintos factores como la pérdida de contratos por utilizar este tipo de vehículos o multas por utilizar vehículos contaminantes. Este punto debe ser estudiado por la empresa y se deberían de hacer varios escenarios para analizar cuánto de importante es esta reducción para la empresa en términos económicos.

$$gl(i) = \frac{(CE(i) * PE + CD(i) * PD) * KM}{100}$$

$$em(i) = \frac{CD(i) * EL * KM}{100}$$

$$pe(i) = \frac{em(i) * PEM}{100}$$

Siendo CE el consumo eléctrico, CD el consumo de diésel, PE el precio de la electricidad, PD el precio del diésel, KM los kilómetros, em las emisiones y pe el precio de las emisiones para cada vehículo del mercado.

Los resultados más relevantes del análisis se guardan en la variable **am**. Esta variable tiene 6 dimensiones:

1. t: Año de compra del vehículo. Desde el año 1 al año final del estudio (TS)
2. j: tamaño del vehículo
3. k: tipo de ruta del vehículo
4. cm: número de vehículo en el mercado correspondiente específicamente a un tamaño y tipo de ruta determinados
5. Tipo de información que almacena:
 1. Posición del vehículo estudiado en la tabla de vehículos del mercado
 2. Net Present Value del vehículo estudiado
 3. Emisiones del vehículo estudiado
6. W: vehículo de adquisición (1) o alquiler (2)

2.4.2 Cálculo del subsidio

Un aspecto que tener en consideración es la evolución del subsidio o incentivo por parte del gobierno en la compra de un vehículo eléctrico. Hasta este momento, no se ha tenido en cuenta esta ayuda tan importante, que puede decidir la compra de un vehículo. Normalmente los gobiernos incentivan la compra de productos más caros que los convencionales pero que tienen aspectos que convienen a la sociedad. Incentivando la compra, se consigue un aumento de las ventas y, por tanto, una evolución en el producto y en la tecnología, consiguiendo que progrese más rápido y tenga un precio menor en el futuro.

Dependiendo del país o el gobierno, la forma de dar incentivos a la población puede variar. Con el fin de hacer el software lo más replicable posible, se ha definido la siguiente forma de calcular la variación de subsidios por parte del estado.

1. El usuario deberá introducir los subsidios actuales para cada vehículo del mercado.
2. El programa calculará la media del net present value de los vehículos de esa tecnología, tipo de ruta y tamaño. A su vez, calculará la media del net present value de los vehículos diésel según los mismos criterios.
3. Se calculará la diferencia del net present value entre la media de la tecnología y la de diésel según el tipo de ruta, tamaño y tecnología.
4. Para el año 1, se calculará que tanto por ciento de la diferencia del NPV de la tecnología y el diésel representa el subsidio.
5. Para el resto de los años, el subsidio de ese tipo de vehículos será el tanto por ciento de la diferencia de las medias de net present value entre la tecnología y el diésel.
6. Cuando un tipo de vehículos alcance la paridad del net present value, al ser la diferencia 0, el subsidio para este tipo de vehículos será nulo ya que no hará faltar dar ayudas a la sociedad para incentivar su compra.

7. Se actualizará el NPV (**am**) de cada vehículo en cada año para añadirle el subsidio correspondiente.

Cálculo del NPV medio para los vehículos diésel y eléctricos según su ruta, tamaño y si son de alquiler o compra para cada año del estudio.

$$mdv(t, j, k, w) = \frac{\sum_{i=1}^{NM} am(t, j, k, x, 2, w)}{cd}$$

$$mev(t, j, k, w) = \frac{\sum_{i=1}^{NM} am(t, j, k, x, 2, w)}{ce}$$

Siendo mdv y mev la media del NPV para vehículos diésel y eléctricos por categoría respectivamente.

Cálculo del subsidio medio para los vehículos diésel y eléctricos según su ruta, tamaño y si son de alquiler o compra para el primer año de estudio.

$$msv(t, j, k, w) = \frac{\sum_{i=1}^{NM} S(am(t, j, k, x, 1, w))}{ce}$$

Siendo msv la media del subsidio por cada categoría de vehículos.

Diferencia del NPV medio entre los vehículos diésel y eléctricos.

$$dm(t, j, k, w) = mev(t, j, k, w) - med(t, j, k, w)$$

Siendo dm la diferencia entre los NPV medios de cada tecnología.

Porcentaje de la diferencia que cubre el subsidio en cada tipo de vehículo para el primer año.

$$sp(j, k, w) = msv(1, j, k, w) / dm(1, j, k, w)$$

Siendo sp el porcentaje de la diferencia entre tecnologías que cubre el subsidio.

Cálculo del subsidio en cada año del estudio teniendo en cuenta la diferencia del NPV entre vehículos diésel y eléctricos, y el porcentaje de subsidio que cubre ese tipo de vehículos.

$$S(t, am(t, j, k, x, 1, w)) = dm(t, j, k, w) * sp(j, k, w)$$

Siendo S el subsidio de cada vehículo del mercado cada año.

Si la diferencia media es negativa, se cambia por 0 y no habrá subsidio para ese año y ese tipo de vehículo. Por último, se actualiza el NPV de la variable am:

$$am(t, j, k, x, 2, w) = am(t, j, k, x, 2, w) + S(t, am(t, j, k, x, 1, w))$$

Siendo i el número de vehículos en el mercado, candidatos a incorporarse a la flota, t el año de compra, j el tamaño del vehículo, k el tipo de ruta, x el número de vehículo con esas características y w si es comprado o alquilado.

2.4.3 Elección de los vehículos a retirar de la flota

Una vez realizado el análisis económico de los vehículos del mercado, se procede a la elección de los vehículos a reemplazar cada año y la combinación óptima de vehículos a incorporar en la flota.

La elección de los vehículos que se van a retirar de la flota cada año se realiza de la siguiente manera según sean vehículos en propiedad o en alquiler. Para los primeros se calcula un coeficiente de reemplazo (c) según sus kilómetros acumulados y edad, teniendo en cuenta su tamaño y su tipo de ruta. De esta forma, no se valora igual los kilómetros o la vida de un vehículo grande o uno pequeño, o un vehículo con una ruta muy larga y otro con una ruta más corta y menos kilómetros.

$$c(t, i) = K(t, i) * \frac{CRD}{KMV(j, k)} + e(t, i) * \frac{CRE}{EMV(j, k)}$$

Siendo c el coeficiente de cada vehículo, K los kilómetros acumulados, e la edad de cada vehículo, CRD y CRE la valoración de los kilómetros y edad respectivamente y KMV y EMV los kilómetros y edad media de cada tecnología.

Los kilómetros acumulados y la edad del vehículo son los factores fundamentales que utilizan las empresas para su renovación de la flota. Esta información recoge intrínsecamente algunos de los aspectos más críticos a la hora de retirar un vehículo de la flota:

- Costes de mantenimiento: a medida que el vehículo tiene más kilómetros, el vehículo tiene más averías y, por tanto, más gastos de mantenimiento.
- Nivel de disponibilidad: al estar cada cierto tiempo reparando las averías, el vehículo se encuentra menos tiempo para su utilización, teniendo un vehículo menos disponible para realizar las rutas.
- Averías en ruta: un vehículo con mayor edad y kilometraje tiene más posibilidades de sufrir una avería mientras está de servicio, produciendo accidentes o retrasos en el reparto.
- Imagen de la empresa: un vehículo antiguo da una mala imagen de la empresa al estar menos actualizados y, normalmente, en peor estado.
- Emisiones del vehículo: los vehículos antiguos emiten más CO_2 que los vehículos nuevos.
- Consumo del vehículo: los vehículos de mayor edad consumen más diésel que los vehículos de menor edad.

Dependiendo de la empresa, puede que el usuario quiera dar mayor o menor peso a uno de estos dos factores. Los coeficientes CRD y CRE permiten al usuario darle mayor o menor importancia a los kilómetros acumulados y a la edad, respectivamente.

Una vez se tienen los coeficientes de todos los vehículos en propiedad, se busca el vehículo con el coeficiente máximo ya que será este el que haya que cambiar. Este proceso se repetirá hasta que se escogen al número de vehículos que se han de reemplazar según la tasa de reemplazo introducida por el usuario.

$$irc(t, j) = \max_{sz} c(t, i)$$

Siendo irc los vehículos con mayor coeficiente de la flota.

Para cualquier empresa es de vital importancia que la tasa de reemplazo se mantenga constante a lo largo del tiempo. La inversión en vehículos de las empresas de transporte representa un gran porcentaje de su Capex anual. Económicamente hablando, que un año se reemplace el 2% de la flota y, al año siguiente un 28% es insostenible, provocando una variación de la inversión anual significativa de un año para otro. Dada la importancia de una tasa de reemplazo constante para este tipo de empresas, se ha optado por mantener

una tasa de reemplazo constante durante todos los años del estudio, a definir por el usuario.

Para los vehículos en alquiler, se comprueba que los vehículos de la flota todavía no han finalizado el periodo de contrato y que los kilómetros acumulados son menores que los estipulados en el contrato.

Posteriormente, la herramienta graba los parámetros más importantes de los vehículos que se van a retirar para poder encontrar en la optimización un vehículo parecido para incorporar a la flota.

- inc: identificador de los vehículos de la flota que se han de reemplazar.
- tnc: tamaño de los vehículos que se han de reemplazar.
- rr: tipo de ruta de los vehículos que se han de reemplazar.
- ac: si el vehículo es de alquiler o en propiedad.

Todas estas matrices tienen dos dimensiones: la primera para identificar el año en el que se tienen que retirar y, la segunda, para determinar un vehículo específico.

Una vez se han identificado todos los vehículos a reemplazar, se escriben los nuevos identificadores, edad y kilómetros de la flota. Estas matrices tienen dos dimensiones haciendo referencia la primera al año y la segunda al vehículo específico de la flota.

Si el vehículo continúa en la flota, el identificador sigue siendo el mismo, la edad se actualiza en un año y los kilómetros aumentan según la media de su tipo de ruta y su tamaño. Si el vehículo se ha de reemplazar, se escribe el nuevo identificador (de la lista que ha introducido el usuario) y se pone a 0 la edad y los kilómetros acumulados.

Una vez se han analizado los vehículos del mercado y se han elegido qué vehículos de la flota se han de reemplazar, se procede a la optimización de la solución. El objetivo de la optimización es obtener el menor net present value llegando al objetivo de reducción de emisiones introducido por el usuario.

2.4.4 Optimización de los vehículos a incorporar en la flota

Cuando se ha determinado qué vehículos hay que reemplazar cada año del estudio y cuáles son las emisiones y NPV de los vehículos candidatos, se procede a realizar la optimización del estudio.

En primer lugar, la herramienta comprueba que con la tasa de reemplazo introducida por el usuario puede cumplir el objetivo de reducción de emisiones. Para ello, sustituye todos los vehículos que se van a retirar por vehículos de cero emisiones. Si la reducción máxima es menor a la reducción deseada por el usuario, la herramienta informará de que con esa tasa de reemplazo no se puede alcanzar el objetivo de reducción de emisiones y procederá a aumentar la tasa de reemplazo (o, alternativamente, relajar el objetivo de reducción de emisiones). Este proceso seguirá hasta que la reducción máxima sea mayor que la reducción de emisiones impuesta por el usuario.

Una vez se asegura de que con ese número de vehículos reemplazados se puede llegar al nivel de reducción requerido, la herramienta realiza una optimización del reemplazo de los vehículos que se han de incorporar basado en el multiplicador de Lagrange. En este proceso, se desea minimizar el NPV total del estudio teniendo en cuenta que la reducción de emisiones al final del estudio debe de ser superior o igual a lo marcado por el usuario.

La herramienta consigue esto minimizando el NPV total del estudio incluyendo un precio sombra para las emisiones que generan cada vehículo.

El precio sombra se define como el valor de una unidad extra del recurso (emisiones) que no es incluido en los cálculos de los coeficientes de la función objetivo (NPV). Por tanto, la herramienta maneja dos soluciones: la solución real de la simulación y la solución dual teniendo en cuenta el precio de las emisiones (solución de precios sombra). A través de iteraciones, la herramienta es capaz de converger un precio sombra de emisiones que consiga una solución con la reducción de emisiones deseada y el NPV mínimo. Esta solución consistirá en los vehículos que se han de incorporar cada año, en sustitución a los vehículos retirados, para optimizar la electrificación de la flota de la empresa.

La función objetivo será la siguiente:

$$crt = \min \left\{ \sum_{t=1}^{TS} \sum_{i=1}^{nt} NPV(t, i) \right\}$$

Restricciones:

$$OR \leq \sum_{i=1}^{nt} \frac{eft(1, i) - eft(TS + 1, i)}{eft(1, i)}$$

A través del precio sombra, la restricción se introduce en la función objetivo. En este caso, se le da un valor ficticio a las emisiones que producen los vehículos que se van a introducir en la flota. De esta forma, según el valor que tome λ (precio sombra), la combinación de vehículos que se deberían incorporar será distinta, al igual que el precio total y la reducción de emisiones.

$$cst = \min \left\{ \sum_{t=1}^{TS} \sum_{i=1}^{nt} (NPV(t, i) + \lambda * eft(t, i)) \right\}$$

Siendo crt y cst el NPV total real y dual de la solución respectivamente. OR es la reducción de emisiones objetivo, λ el precio sombra y eft las emisiones de cada vehículo de la flota.

A través de iteración, el programa converge a una combinación de vehículos con una reducción de emisiones mayor o igual que la deseada y un NPV minimizado. Así, la herramienta maneja dos soluciones, la variable cst es la solución dual incluyendo el precio sombra. En ella, la herramienta calcula cual es el cst de cada vehículo candidato a reemplazar al vehículo que se va a retirar de la flota. Los vehículos candidatos son los vehículos disponibles en el mercado que tienen el mismo tamaño y ruta que el vehículo que se va a retirar de la flota.

Cuando ya se ha calculado el cst de cada uno de los vehículos del mercado candidatos a incorporarse a la flota, la herramienta escoge el que sea menor. Este proceso se repite para todos los vehículos a reemplazar cada año y para todos los años del estudio. Al finalizar, se verifica si la reducción de emisiones de la combinación es mayor que la requerida por el usuario.

Este proceso iterativo se repite siguiendo el siguiente proceso en cada año del estudio:

1. $l=0$: La primera iteración tiene un precio sombra (λ) igual a 0. Esto quiere decir, que $cst=crt$ y la elección de los vehículos a incorporarse será únicamente por su NPV, sin tener en cuenta las emisiones. Si al calcular la reducción total de emisiones del estudio el resultado es mayor que la deseada, esta solución será la óptima, puesto que es la combinación que tiene menor NPV. Si no llega a la reducción deseada, se continúa con el proceso.
2. $l=1.000.000$. La segunda iteración lleva la ecuación al otro extremo. Con un valor de λ ridículamente alto como $1.000.000\text{€}/tCO_2$, el primer término de la ecuación queda despreciable, siendo el vehículo con el cst menor el que produce menos emisiones. Esta solución será la que tenga la mayor reducción de emisiones sin importar el NPV, por lo que $cst \gg crt$. La reducción de emisiones de esta combinación será siempre mayor que el requerido por el usuario, ya que se ha comprobado antes de empezar la optimización que lo sea.
3. A partir de este momento, el precio sombra (λ) se calcula teniendo en cuenta si la reducción de la iteración (ite) es mayor o menor que la reducción objetivo. Además, los valores de λ se guardan en una variable auxiliar, dependiendo si son valores cuya combinación de vehículos hace que se cumpla o no la reducción de emisiones deseada.

$$Si\ rt(ite - 1) \geq OR \rightarrow yes = \lambda$$

$$Si\ rt(ite - 1) < OR \rightarrow no = \lambda$$

$$Si\ rt(ite) \geq OR \rightarrow \lambda(ite + 1) = \lambda(ite) - \frac{|\lambda(ite) - no|}{2}$$

$$Si\ rt(ite) < OR \rightarrow \lambda(ite + 1) = \lambda(ite) + \frac{|\lambda(ite) - yes|}{2}$$

Siendo rt la reducción de emisiones de cada ite que es la iteración actual.

4. El proceso se repite, convergiendo el valor de λ y, por tanto, la mejor combinación. La optimización finaliza cuando $\lambda(ite) - \lambda(ite-1) < 0,0001$.

En las siguientes gráficas se puede observar la representación de las distintas combinaciones que se llevan a cabo en el proceso de optimización. Para un objetivo de reducción de emisiones del 58%, la optimización ha ido convergiendo hasta quedarse entre la opción de 57% y 60,3% de reducción. La gráfica de la izquierda representa el % de reducción de emisiones en el eje y, mientras en el eje x se ve el cst de cada combinación. La gráfica de la derecha representa el % de reducción de emisiones en el eje y, mientras en el eje x se ve el crt de cada combinación.

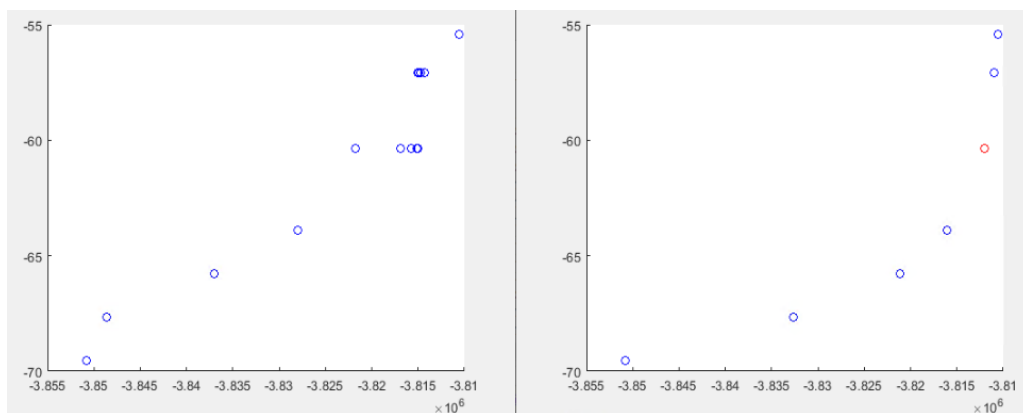


Figura 17: Diagrama de dispersión del proceso de optimización

Como se observa, en la gráfica de la izquierda, para la misma reducción de emisiones, se obtienen distintos valores de cst. Esto se debe a que en este resultado interviene el precio sombra (λ) de las emisiones, que va variando de una iteración a otra. Sin embargo, en la gráfica de la derecha muestra las mismas combinaciones de vehículos, pero, al ser crt, no tiene en cuenta el precio sombra y representa el NPV total del estudio, sin tener en cuenta las emisiones. Es por ello por lo que siempre se obtiene el mismo valor para la misma combinación, aunque el precio sombra cambie, ya que no lo tiene en cuenta.

El usuario puede elegir como quiere que funcione la optimización del estudio. Para ello, antes de empezar la simulación debe de elegir en el Excel entre 2 modos de funcionamiento:

1. Reducción necesariamente mayor al objetivo: Si el usuario introduce una reducción de emisiones OR, el resultado de reducción de emisiones de la combinación óptima debe de ser mayor o igual a OR. Es decir:

$$rt(ite) \geq OR$$

2. Reducción más cercana al objetivo: Si el usuario introduce una reducción de emisiones OR, el resultado de reducción de emisiones de la combinación óptima será la más cercana a OR. Es decir, se elegirá la mejor opción:

$$\min\{|no - OR|, |yes - OR|\}$$

Siguiendo con el ejemplo anterior, para una reducción de emisiones requerida del 58%, en el primer modo de optimización, la combinación óptima tiene una reducción del 60,3%. En el segundo modo de optimización, la combinación óptima tiene una reducción de emisiones del 57%, por debajo del deseado por el usuario, pero más cercano al objetivo que la combinación de 60%.

Para finalizar la simulación, se escriben los resultados deseados en hojas Excel para que el usuario pueda estudiarlas. Se pueden seleccionar los informes que se quieren sacar del programa sin tener que generar todos ellos, lo que llevaría un tiempo considerable. Entre ellas están las siguientes:

- Hoja con los vehículos reemplazados y a incorporar de cada año.
- Hoja con el net present value de cada año y el total del estudio.
- Hoja con las emisiones de cada año y la reducción total de emisiones de la solución óptima.
- Hoja con la variación de los identificadores de la flota año tras año.
- Hoja con la variación de la edad de la flota año tras año.
- Hoja con la variación de los kilómetros acumulados de la flota año tras año.
- Hoja con la variación de las emisiones de la flota año tras año.
- Hoja con el análisis económico de los vehículos a incorporar en la flota cada año.

Si el usuario, observando la nube de posibilidades, quisiera obtener los resultados de una solución más económica, pero con menor reducción de emisiones, debería cambiar el objetivo de reducción y situarlo en el que tiene la solución que quiere estudiar, simulando otra vez el programa.

2.5 Descripción del software

El software está escrito en lenguaje de programación M, utilizando el programa Matlab de gestión y análisis de datos. Para conseguir una mejor interacción entre el usuario y la máquina, la recogida de datos y la entrega de resultados se realiza a partir del programa Excel, usado por la mayoría de los usuarios y con una interfaz más intuitiva.

En primera instancia, el usuario deberá colocar en la misma carpeta los ficheros de Excel y el código del programa para su correcta lectura y escritura.

En el Excel “Fleet Electrification Information” se deberá rellenar 4 pestañas:

- **Current Fleet Information:** el usuario deberá introducir los datos de los vehículos que componen su flota en el momento actual, con datos tales como los kilómetros totales, kilómetros en el último año, litros de diésel consumidos o si se trata de un vehículo en alquiler o en propiedad.
- **Market Vehicles Information:** el usuario deberá introducir datos relativos a los vehículos disponibles en el mercado con relación a costes, consumos, si son de compra o alquiler o la cantidad de subsidios/incentivos que disponen actualmente. Estos vehículos serán los candidatos para incorporarse en la flota durante la simulación.
- **Parameters:** el usuario deberá introducir los parámetros deseados para realizar la simulación como el número de años que dura, tasa de reemplazo u objetivo de reducción de emisiones. Además, deberá introducir los tipos de ruta y los tamaños de vehículos que existen en su flota.
- **Reports:** el usuario podrá seleccionar los informes que desea visualizar al acabar la simulación.

Una vez guardado el documento, el usuario podrá proceder a la ejecución de la simulación. La duración de esta dependerá de distintos aspectos como pueden ser el tamaño de la flota, la tasa de reemplazo, los años de estudio o el objetivo de reducción de emisiones.

Al finalizar la simulación, se representará un diagrama de dispersión con las distintas combinaciones posibles. De esta forma, el usuario podrá observar si cumplir el objetivo de reducción de emisiones le supone una inversión mucho mayor que una combinación cercana al objetivo. Conociendo esta información, la simulación se podrá repetir variando el objetivo de reducción al de la combinación que se considere mejor para poder obtener los resultados de esta solución.

Los resultados de la combinación óptima se escribirán en ficheros Excel donde se mostrarán los informes deseados, los cuales se podrán utilizar para conseguir distintos gráficos y tablas.

2.6 Conclusión

La metodología del proyecto se basa en tres áreas: análisis económico de los vehículos del mercado, elección de los vehículos a retirar de la flota y optimización de los vehículos a incorporar.

El análisis económico de los vehículos del mercado se realiza basado en un flujo de caja, calculando el “cost of ownership” de cada vehículo que será candidato a incorporarse a la flota. Con el fin de predecir el comportamiento de distintos costes asociados a la adquisición de vehículos, se ha desarrollado una metodología en dos de los aspectos más influyentes en el precio:

- Evolución del precio de los vehículos eléctricos: considerando la evolución del precio de la batería de litio, componente que acapara el 35% del precio total.
- Evolución de los subsidios o incentivos por parte de los gobiernos al adquirir un vehículo eléctrico: obteniendo el porcentaje que cubre el subsidio respecto a la diferencia entre el NPV de los vehículos diésel y eléctricos el primer año. Para los años posteriores, ese porcentaje se mantendrá constante, pudiendo calcular el subsidio anual según la diferencia entre el NPV de los vehículos diésel y eléctricos cada año. Una vez se alcance la paridad de las tecnologías, los subsidios serán 0.

La elección de renovación de la flota se realiza de diferente forma según sea un vehículo en alquiler o en propiedad. Para el primero, la decisión de que un vehículo alquilado sea reemplazado es que su contrato de alquiler haya concluido. Para los vehículos en propiedad, se halla un coeficiente en base a su edad y kilómetros acumulados. Según la tasa de reemplazo introducida por el usuario, se elegirán para retirar el número de vehículos con mayor coeficiente.

Por último, una vez se sabe qué vehículos se han de retirar y cuáles son las características de los vehículos en el mercado, se procede a la optimización. El objetivo es minimizar el valor absoluto del NPV total del estudio siempre y cuando la reducción de emisiones al final del estudio sea mayor que la requerida por el usuario. Utilizando un precio sombra para las emisiones de los vehículos a incorporar, se realiza una iteración para conseguir la combinación óptima que dé como resultado el menor NPV y la reducción de emisiones requerida.

Se ha desarrollado una herramienta con el fin de que este proyecto sea práctico para distintas empresas. A través del programa informático Matlab, se ha escrito un código en lenguaje M para realizar casos de estudio. Con el fin facilitar el uso al usuario, los datos necesarios serán introducidos completando un Excel. Por otro lado, una vez el programa termine la simulación, los resultados serán escritos en otro fichero Excel para el posterior análisis del usuario. Para finalizar, se ha creado un ejecutable que permite utilizar la herramienta sin necesidad de tener instalado Matlab, lo que permite su uso sin necesidad de tener instalada la licencia del programa.

3 Aplicación al caso de estudio de Loomis

3.1 Introducción

Con el fin de plasmar la metodología en un caso de estudio, se ha optado por realizar distintas simulaciones con la flota de vehículos de la empresa Loomis. La compañía sueca se encuentra en el sector del transporte de dinero en efectivo donde utiliza vehículos diferentes según la normativa del país y el valor de la carga.

Las simulaciones se realizarán utilizando la flota de vehículos de la delegación de Madrid, la cual se compone de 60 vehículos con diferentes tamaños, tipos de ruta asignados y edades diferentes. A lo largo del apartado se harán simulaciones de distintos casos para entender como la empresa debería renovar su flota y a las incertidumbres a las que se podría enfrentar si varían distintos parámetros.

3.2 Datos de la flota actual

La flota actual de la base de Madrid se compone de 60 vehículos. Entre estos vehículos se encuentran diferentes clases, debido a su tamaño, el tipo de ruta que cubre o el nivel de protección balística que llevan. Como cualquier flota de vehículos, los vehículos de Loomis se pueden clasificar en 3 tipos según su tamaño y otros 3 tipos según su ruta.

Los 3 tamaños disponibles en la flota son los siguientes:

- Pequeño: vehículo blindado de 7,2 toneladas con una altura inferior a 2,1 metros. Este tipo de vehículos se suelen utilizar para sitios poco accesibles como pueden ser el centro de la ciudad o clientes con espacios de aparcamiento reducidos.
- Mediano: vehículo blindado de 7,2 toneladas con una altura superior a 2,1 metros. Este tipo de vehículo se utiliza para el resto de las rutas que cubre la delegación.
- Grande: vehículos blindados superiores a 7,2 toneladas. Este vehículo se utiliza para distintas aplicaciones: trayectos al banco central, lanzadera entre distintas delegaciones, etc.

Por otro lado, los vehículos se pueden dividir en 3 tipos fundamentales según su ruta:

- Ruta 1: la ruta en la que están designados tiene menos de 140 km.
- Ruta 2: la ruta en la que están designados tiene entre 140 km y 225 km.
- Ruta 3: la ruta en la que están designados tiene más de 225 km.

Los tamaños y las rutas de la flota las define el usuario, dándole una mayor libertad para tener más o menos categorías para clasificar su flota. De igual manera, la generalidad de la herramienta permite al usuario definir tantos tipos de ruta como él quiera, pudiendo incluir valores en la categoría que no sean los kilómetros. Por ejemplo, la ruta 1 podría ser con menos de 140 km y menos de 2 millones de euros.

Utilizando estas clasificaciones de vehículos según su tamaño y ruta, la empresa es capaz de buscar vehículos en el mercado que tengan características similares a su flota. Estos

vehículos serán los candidatos a incorporarse a la flota cuando un vehículo de la flota actual se retire, siempre y cuando correspondan al mismo tamaño y ruta.

Los vehículos tienen una fecha de matriculación entre 2007 y 2020, lo que significa que el automóvil más antiguo de la flota tiene 14 años y el más nuevo 1 año. Por otro lado, se pueden observar los kilómetros acumulados de cada uno de los vehículos. Normalmente, los kilómetros acumulados tienden a ir relacionados con los años de los vehículos, aunque, como tienen asignadas rutas distintas, siempre hay vehículos que tienen más kilómetros al año. El coche con menos kilómetros tiene 3.952 km y el que más tiene 933.971 km, que es un vehículo grande y utilizado durante muchos años.

La columna “Kilómetros 2020” muestra las distancias que ha recorrido cada vehículo en el último año, valor que suele ir relacionado con los kilómetros acumulados. Sin embargo, se pueden encontrar vehículos muy antiguos que se utilizan solo en casos de urgencia. Es el caso del vehículo 775, el cual se ha utilizado solo 4.370 km al tener 13 años de antigüedad.

Las siguientes dos columnas muestran los litros de diésel que ha repostado cada vehículo y el consumo de cada uno medido en litros/100km. Se observa claramente como los vehículos más antiguos son los que más consumen. Esto se debe a dos razones:

- La tecnología evoluciona y los coches actuales consumen menos que los antiguos.
- Los componentes de un vehículo antiguo no tienen la misma eficiencia que uno nuevo y consumen más diésel.

Para finalizar, la última columna de la tabla indica si los vehículos que componen la flota han sido comprados o alquilados. En este caso, todos los automóviles de Loomis han sido comprados por la empresa. La compra de vehículos en las flotas de empresas dedicadas al transporte suele ser habitual, ya que es un bien esencial para realizar la actividad principal de la empresa. En el caso concreto de las empresas de transporte de dinero en efectivo, los vehículos representan la base de su negocio y la seguridad del mismo, por lo que suelen adquirirse. Además, al ser vehículos diseñados y fabricados con un alto nivel de protección balística, el mercado de segunda mano es muy reducido y a las empresas de alquiler no les interesa.

Tabla 22: Datos de los vehículos de la flota actual de Loomis

Identificador	Tamaño	Tipo Ruta	Año Matriculación	Kilometros Totales	Kilómetros 2020	Diesel 2020	Consumo 2020	Alquiler o Compra
760	Pequeño	3	2007	531.320	9.557	1.937	20,27	Compra
772	Pequeño	2	2008	426.527	11.127	2.657	23,88	Compra
775	Grande	3	2008	124.674	4.370	1.034	23,66	Compra
781	Pequeño	1	2008	497.356	35.284	5.977	16,94	Compra
784	Pequeño	3	2008	566.570	35.488	6.129	17,27	Compra
785	Pequeño	3	2008	643.132	20.940	4.252	20,31	Compra
793	Pequeño	1	2008	495.410	37.470	5.610	14,97	Compra
799	Grande	3	2008	542.438	23.902	4.878	20,41	Compra
809	Mediano	1	2009	543.730	24.250	4.751	19,59	Compra
811	Mediano	2	2009	502.799	25.415	4.846	19,07	Compra
822	Grande	1	2009	933.971	97.098	14.997	15,44	Compra
849	Grande	2	2010	714.063	64.638	10.594	16,39	Compra
852	Grande	3	2010	448.330	24.358	5.232	21,48	Compra
856	Mediano	1	2010	411.494	19.574	4.111	21,00	Compra
882	Mediano	1	2011	442.485	27.426	5.665	20,66	Compra
884	Mediano	3	2011	457.300	38.189	6.608	17,30	Compra
893	Pequeño	2	2011	445.973	44.660	7.663	17,16	Compra
900	Mediano	3	2011	422.041	30.198	6.138	20,33	Compra
927	Pequeño	3	2008	466.114	9.190	2.202	23,96	Compra
929	Pequeño	2	2011	230.570	14.823	2.999	20,23	Compra
964	Mediano	2	2012	320.778	23.232	4.029	17,34	Compra
1010	Mediano	2	2014	316.286	31.640	4.872	15,40	Compra
1011	Mediano	3	2014	308.502	23.992	4.294	17,90	Compra
1015	Mediano	3	2014	276.175	39.225	6.990	17,82	Compra
1017	Mediano	3	2014	281.408	34.246	7.111	20,77	Compra
1019	Pequeño	1	2015	212.648	27.927	5.394	19,32	Compra
1503	Mediano	1	2015	254.264	41.266	6.245	15,13	Compra
1517	Mediano	1	2016	205.123	32.459	5.496	16,93	Compra
1518	Mediano	2	2015	249.804	43.662	7.144	16,36	Compra
1523	Mediano	3	2015	226.400	27.427	4.743	17,29	Compra
1533	Mediano	1	2016	71.028	13.313	0	0,00	Compra
1536	Mediano	3	2015	231.245	32.022	5.463	17,06	Compra
1537	Mediano	2	2015	232.604	43.356	7.070	16,31	Compra
1539	Mediano	1	2015	233.528	40.112	7.130	17,77	Compra
1613	Mediano	1	2016	187.378	30.197	4.914	16,27	Compra
1614	Mediano	3	2017	171.582	38.798	6.526	16,82	Compra
1623	Mediano	2	2017	182.405	46.035	8.046	17,48	Compra
1635	Mediano	1	2018	85.147	9.348	1.928	20,62	Compra
1703	Mediano	1	2017	152.270	45.472	8.065	17,74	Compra
1709	Mediano	3	2017	139.320	38.133	7.964	20,88	Compra
1717	Mediano	2	2017	137.514	31.719	6.432	20,28	Compra
1721	Mediano	1	2017	150.448	44.874	7.447	16,59	Compra
1724	Mediano	2	2017	135.465	33.196	6.263	18,87	Compra
1728	Mediano	2	2019	35.882	35.882	6.151	17,14	Compra
1731	Mediano	2	2019	45.559	23.829	4.365	18,32	Compra
1733	Pequeño	2	2018	88.439	26.341	4.718	17,91	Compra
1734	Pequeño	3	2018	92.269	33.450	5.432	16,24	Compra
1805	Mediano	3	2019	66.932	30.939	5.649	18,26	Compra
1809	Mediano	3	2019	57.166	26.152	3.864	14,77	Compra
1810	Mediano	1	2019	73.290	43.352	7.835	18,07	Compra
1815	Mediano	3	2019	76.589	44.399	7.828	17,63	Compra
1816	Mediano	3	2019	81.993	41.769	6.857	16,42	Compra
1817	Mediano	3	2019	58.478	30.132	5.808	19,28	Compra
1829	Mediano	2	2020	10.030	10.030	1.499	14,95	Compra
1932	Mediano	3	2020	40.373	40.373	6.982	17,29	Compra
1943	Pequeño	3	2020	8.466	8.466	1.241	14,66	Compra
1946	Pequeño	3	2020	3.952	3.952	453	11,46	Compra
1947	Mediano	3	2020	38.110	38.110	5.248	13,77	Compra
1949	Mediano	2	2020	42.797	42.797	7.382	17,25	Compra
1950	Mediano	3	2020	42.102	42.102	6.771	16,08	Compra

3.3 Datos de los vehículos del mercado

La siguiente tabla muestra los distintos vehículos que hay en el mercado. Estos automóviles deben de ser capaces de suplir a los que se van a retirar de la flota, por lo que deben tener características similares. Mediante el tamaño y tipo de ruta de los vehículos, la herramienta identifica cuales son candidatos para incorporarse sustituyendo a otro de su misma categoría.

En este estudio se han utilizado dos vehículos para cada tipo de vehículo, según su ruta y su tamaño. De estos dos vehículos para cada categoría, uno de ellos es diésel y el otro eléctrico. Un total de 18 vehículos componen los coches disponibles en el mercado donde los nombres y los valores económicos no son reales debido a la privacidad de la empresa. El usuario podría introducir tantos vehículos como desee de cada categoría, aunque mínimo tendrá que haber uno, ya que si no sería imposible reemplazar el vehículo de la flota.

Tabla 23: Datos de los vehículos disponibles en el mercado

Marca	Modelo	Tipo	Tamaño	Tipo de Ruta	Valor Adquisición / Cuota mensual	Valor Mantenimiento (Anual)	Valor Seguro (Anual)	Tasas de circulación (Anual)	Peajes (Anual)	Valor Residual	Consumo Combustible (/100km)	Consumo Eléctrico (kWh/100km)	Otros costes de inversión	Otros costes anuales	Compra o Alquiler	Subsidio	Amortización
Iveco	Daily	Diésel	Mediano	1	80.000 €	400 €	1.000 €	150 €	100 €	1.000 €	18 €	0 €	0 €	0 €	Compra	0 €	7
Iveco	E-Daily	Eléctrico	Mediano	1	120.000 €	200 €	1.000 €	50 €	0 €	1.200 €	0 €	40 €	0 €	0 €	Compra	2.500 €	7
Citroen	Jumpy	Diésel	Pequeño	1	20.000 €	200 €	500 €	100 €	100 €	500 €	10 €	0 €	0 €	0 €	Compra	0 €	7
Citroen	e-Jumpy	Eléctrico	Pequeño	1	30.000 €	100 €	500 €	0 €	0 €	800 €	0 €	30 €	0 €	0 €	Compra	2.000 €	7
MAN	TGM	Diésel	Grande	1	150.000 €	800 €	1.200 €	200 €	100 €	1.500 €	20 €	0 €	0 €	0 €	Compra	0 €	7
MAN	eTGM	Eléctrico	Grande	1	230.000 €	500 €	1.200 €	100 €	0 €	1.300 €	0 €	50 €	0 €	0 €	Compra	2.800 €	7
VW	Daily	Diésel	Mediano	2	80.000 €	400 €	1.000 €	150 €	100 €	1.000 €	18 €	0 €	0 €	0 €	Compra	0 €	7
VW	E-Daily	Eléctrico	Mediano	2	120.000 €	200 €	1.000 €	50 €	0 €	1.200 €	0 €	40 €	0 €	0 €	Compra	2.500 €	7
Seat	Jumpy	Diésel	Pequeño	2	20.000 €	200 €	500 €	100 €	100 €	500 €	10 €	0 €	0 €	0 €	Compra	0 €	7
Seat	e-Jumpy	Eléctrico	Pequeño	2	30.000 €	100 €	500 €	0 €	0 €	800 €	0 €	30 €	0 €	0 €	Compra	2.000 €	7
Tesla	TGM	Diésel	Grande	2	150.000 €	800 €	1.200 €	200 €	100 €	1.500 €	20 €	0 €	0 €	0 €	Compra	0 €	7
Tesla	eTGM	Eléctrico	Grande	2	230.000 €	500 €	1.200 €	100 €	0 €	1.300 €	0 €	50 €	0 €	0 €	Compra	2.800 €	7
Nissan	Daily	Diésel	Mediano	3	80.000 €	400 €	1.000 €	150 €	100 €	1.000 €	18 €	0 €	0 €	0 €	Compra	0 €	7
Nissan	E-Daily	Eléctrico	Mediano	3	120.000 €	200 €	1.000 €	50 €	0 €	1.200 €	0 €	40 €	0 €	0 €	Compra	2.500 €	7
Renault	Jumpy	Diésel	Pequeño	3	20.000 €	200 €	500 €	100 €	100 €	500 €	10 €	0 €	0 €	0 €	Compra	0 €	7
Renault	e-Jumpy	Eléctrico	Pequeño	3	30.000 €	100 €	500 €	0 €	0 €	800 €	0 €	30 €	0 €	0 €	Compra	2.000 €	7
Volta	TGM	Diésel	Grande	3	150.000 €	800 €	1.200 €	200 €	100 €	1.500 €	20 €	0 €	0 €	0 €	Compra	0 €	7
Volta	eTGM	Eléctrico	Grande	3	230.000 €	500 €	1.200 €	100 €	0 €	1.300 €	0 €	50 €	0 €	0 €	Compra	2.800 €	7

En la tabla se distinguen los diferentes vehículos según su marca, modelo, tecnología que utilizan y en que categoría se encuentran según su tamaño y ruta. Además, el usuario debe introducir los valores económicos de los vehículos, así como su consumo de combustible o electricidad. Por último, el usuario debe indicar si son vehículos para comprar o alquilar, el subsidio o ayuda por parte del gobierno y el periodo de amortización de cada vehículo, en este caso, 7 años.

3.4 Simulación 1: Caso base

El caso base del estudio corresponde a la situación más realista posible y a la que tiene más posibilidades de producirse en el futuro. En simulaciones posteriores, se analizarán otras situaciones futuras que pueden afectar en mayor medida a los resultados de la simulación.

3.4.1 Parámetros

A continuación, se definen los parámetros de este caso de estudio. Cabe destacar la tasa de reemplazo para los vehículos comprados del 10% que se mantiene constante a lo largo

de los años del estudio. Además, el estudio durará 9 años para que finalice en el 2030, año marcado por los objetivos de reducción de emisiones impuestos por la Unión Europea y la propia empresa. Los objetivos internos de reducción de emisiones de CO₂ son del 50%. Este porcentaje es alto y exigente para la empresa que apuesta claramente por una visión sostenible de la sociedad.

A nivel económico, se han introducido los datos de electricidad y diésel que tiene la empresa, así como los impuestos, la inflación y la tasa de retorno interna del 7%. La amortización de los vehículos se ha fijado en 7 años como ya se ha mencionado anteriormente. Por último, cabe destacar el precio de las emisiones. Este precio, no es un precio real sino un precio ficticio marcado por la empresa que abarca las oportunidades de negocio que se pueden perder y los efectos perjudiciales de las emisiones de CO₂. El precio interno fijado para estas emisiones son 82€/ton CO₂.

Para finalizar, se ha elegido el modo de simulación que elige la optimización para que la reducción de emisiones sea necesariamente mayor al 50%. Más adelante, se puede valorar la opción de elegir el modo de simulación para obtener la solución óptima más cercana al objetivo, sin ser necesariamente mayor que este.

Tabla 24: Simulación 1: Parámetros

Parámetros	
Coeficiente para Km	0,5
Coeficiente para Edad	0,5
Tasa Reemplazo Compra	10,00%
Años Estimación	9
Año Actual	2021
Amortización	7
Precio Electricidad (€/kWh)	0,12
Precio Diésel (€/litro)	0,85
Emisiones CO ₂ (kg/litro)	2,65
Precio Emisiones (€/ton CO ₂)	82
Cambio en el IPC	1,4%
Impuestos	21%
Tasa de Retorno	7%
Objetivo Reducción Emisiones CO ₂	50%
Modo de simulación	Reducción necesariamente mayor al objetivo

3.4.2 Estudio Económico

Este apartado analizará los resultados económicos obtenidos durante la simulación. En ellos, se podrá entender el reemplazo que la empresa debe de hacer cada año, así como el coste en cada uno de los vehículos y en la totalidad del estudio.

La primera tabla de resultados muestra el NPV de cada uno de los vehículos disponibles en el mercado. Este resultado varía para cada vehículo según su año de compra. Esto se debe a la reducción del precio de los vehículos eléctricos y, en consecuencia, los

incentivos dados por el gobierno. Para los vehículos diésel, el NPV se mantiene, ya que no se contempla una gran variación en los precios y costes a lo largo del estudio.

Los vehículos están en el mismo orden que en la tabla donde se muestran todas sus características. Por tanto, los índices impares corresponden a vehículos diésel mientras que los índices pares corresponden a vehículos eléctricos.

Esta tabla da una información muy importante como es la paridad entre las distintas tecnologías. La paridad se define como el punto en el que el NPV de dos vehículos de distintas tecnologías alcanza el mismo valor. En esta simulación, la paridad entre los vehículos medianos con ruta 1 se alcanza entre el año 2027 y 2028. Esto quiere decir que, si queremos comprar un vehículo de esta categoría antes de 2027, la opción más económica es el vehículo diésel, mientras que si lo queremos comprar después de 2028, lo mejor sería comprar el vehículo eléctrico. Esto no quiere decir que el precio de compra del vehículo eléctrico sea inferior al del vehículo diésel si no que el “cost of ownership” total del vehículo es más económico. Esto se debe principalmente al gasto en combustible, mantenimiento o ayudas.

Otro ejemplo serían los vehículos 5 y 6, correspondientes a vehículos grandes con ruta 1. Al ser vehículos grandes, la tecnología no está lo suficientemente desarrollada como para tener vehículos de gran tonelaje con autonomías para hacer las rutas. Es por ello, que la paridad entre los vehículos diésel y eléctrico no se alcanza en todo el estudio, por lo que siempre resultará más económico adquirir el vehículo diésel, si no se da valor a las emisiones.

Tabla 25: Simulación 1: NPV de los vehículos del mercado

Año Estudio / Vehículo Mercado	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
1 -	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €
2 -	111.318 €	108.663 €	106.252 €	104.046 €	102.019 €	100.145 €	98.407 €	96.788 €	95.275 €
3 -	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €
4 -	32.137 €	31.474 €	30.871 €	30.320 €	29.813 €	29.344 €	28.910 €	28.505 €	28.127 €
5 -	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €
6 -	206.883 €	201.795 €	197.172 €	192.945 €	189.059 €	185.469 €	182.138 €	179.035 €	176.134 €
7 -	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €
8 -	111.318 €	108.663 €	106.252 €	104.046 €	102.019 €	100.145 €	98.407 €	96.788 €	95.275 €
9 -	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €
10 -	32.137 €	31.474 €	30.871 €	30.320 €	29.813 €	29.344 €	28.910 €	28.505 €	28.127 €
11 -	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €
12 -	206.883 €	201.795 €	197.172 €	192.945 €	189.059 €	185.469 €	182.138 €	179.035 €	176.134 €
13 -	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €
14 -	111.318 €	108.663 €	106.252 €	104.046 €	102.019 €	100.145 €	98.407 €	96.788 €	95.275 €
15 -	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €
16 -	32.137 €	31.474 €	30.871 €	30.320 €	29.813 €	29.344 €	28.910 €	28.505 €	28.127 €
17 -	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €
18 -	206.883 €	201.795 €	197.172 €	192.945 €	189.059 €	185.469 €	182.138 €	179.035 €	176.134 €

La segunda tabla es la más completa de la simulación. En ella se encuentra la información fundamental de éste debe ser la que considere puesto que es la que muestra la solución óptima del estudio. Con esta tabla, el usuario entiende que vehículos tiene que retirar de la flota cada año y que vehículos incorporar, así como cuál será el NPV de estos vehículos.

Cada año de estudio, la herramienta selecciona 6 vehículos a retirar y, por tanto, 6 vehículos a incorporar de los que hay disponibles en el mercado, ya que la flota es de 60 vehículos y se considera una tasa de reemplazo del 10%.

La primera columna de la tabla indica el año del estudio en el que se está situado. Las tres columnas siguientes están relacionadas con el vehículo que se va a retirar de la flota: identificador, tamaño y ruta. El tamaño y ruta serán iguales para el vehículo a incorporar y el que se retira, por lo que es una información que comparten ambos.

La cuarta columna muestra si el vehículo que se incorpora debe de alquilarse o comprarse siguiendo el análisis económico y la política de la empresa. La quinta columna define el identificador que llevará el vehículo que se incorpora a la flota, a definir previamente por el usuario el número que quiera.

Las cuatro últimas columnas hacen referencia al vehículo que se incorpora: marca, modelo, tipo de tecnología que utiliza y NPV de la adquisición. En el análisis de los resultados medioambientales, el usuario podrá ver las distintas soluciones de vehículos a incorporar que maneja la simulación. Al encontrarse la solución óptima cerca de la solución con NPV mínimo, significa que la mayoría de las sustituciones tendrán como reemplazo el vehículo más barato, salvo alguna incorporación donde, para lograr el objetivo de reducción de emisiones, se tiene que comprar un vehículo más caro, pero con unas emisiones de partículas contaminantes menores.

Esto se puede observar claramente comparando la tabla de arriba con la de abajo. La tabla de arriba nos dirá que vehículo es más barato cada año para una categoría. En la tabla de abajo se podrá confirmar si el vehículo que se decide incorporar es el de menor NPV o no. Al ser la solución óptima cercana a la solución con el NPV mínimo, es decir, tener un precio sombra (λ) pequeño, casi todas las incorporaciones serán el vehículo más barato. Por ejemplo, en 2027, los vehículos medianos con ruta 1 tienen un menor NPV para el coche diésel (99.288,4€) que su homónimo eléctrico (100.154,43€). La decisión de incorporar el vehículo eléctrico en vez del diésel no ha sido económica si no medioambiental con el fin de llegar a la reducción de emisiones que se ha requerido en la simulación.

Analizando la tabla, se puede observar que en los primeros años del estudio la empresa tiene que incorporar más vehículos diésel y, a medida que pasan los años, cada vez hay una mayor representación de vehículos eléctricos en los automóviles a incorporar. Este resultado es el claro reflejo de lo que pasa y pasará en el sector. Año tras año la tecnología se irá desarrollando, consiguiendo mejores prestaciones en los coches y un menor precio a medida que las ventas aumenten y se puedan producir vehículos eléctricos a gran escala.

También, es conveniente señalar que los primeros vehículos eléctricos que entran en la flota son los de tamaño pequeño y que no hay ningún vehículo de tamaño grande que se reemplace por otro con tecnología eléctrica, todos son diésel. Como un claro reflejo de la realidad, actualmente se ven vehículos eléctricos por las calles de tamaño pequeño o turismos, mientras que encontrar automóviles grandes con motor eléctrico como furgonetas o camiones resulta improbable. Durante los próximos años, la tecnología se desarrollará exponencialmente, pudiendo ofrecer vehículos más exigentes en cuanto a peso y autonomía a un precio competitivo con su homónimo de diésel.

Tabla 26: Simulación 1: Vehículos a retirar e incorporar en cada año del estudio

Año	Identificador	Tamaño	Ruta	Identificador	Marca	Modelo	Tipo	NPV
2022	760	Pequeño	3	1	Renault	e-Jumpy	Eléctrico	- 32.137 €
	784	Pequeño	3	2	Renault	e-Jumpy	Eléctrico	- 32.137 €
	785	Pequeño	3	3	Renault	e-Jumpy	Eléctrico	- 32.137 €
	799	Grande	3	4	Volta	TGM	Diesel	- 163.814 €
	852	Grande	3	5	Volta	TGM	Diesel	- 163.814 €
	927	Pequeño	3	6	Renault	e-Jumpy	Eléctrico	- 32.137 €
2023	772	Pequeño	2	7	Seat	e-Jumpy	Eléctrico	- 31.474 €
	781	Pequeño	1	8	Citroen	e-Jumpy	Eléctrico	- 31.474 €
	809	Mediano	1	9	Iveco	Daily	Diesel	- 99.288 €
	811	Mediano	2	10	VW	Daily	Diesel	- 99.288 €
	882	Mediano	1	11	Iveco	Daily	Diesel	- 99.288 €
	893	Pequeño	2	12	Seat	e-Jumpy	Eléctrico	- 31.474 €
2024	793	Pequeño	1	13	Citroen	e-Jumpy	Eléctrico	- 30.871 €
	849	Grande	2	14	Tesla	TGM	Diesel	- 163.814 €
	856	Mediano	1	15	Iveco	Daily	Diesel	- 99.288 €
	884	Mediano	3	16	Nissan	Daily	Diesel	- 99.288 €
	900	Mediano	3	17	Nissan	Daily	Diesel	- 99.288 €
	964	Mediano	2	18	VW	Daily	Diesel	- 99.288 €
2025	822	Grande	1	19	MAN	TGM	Diesel	- 163.814 €
	929	Pequeño	2	20	Seat	e-Jumpy	Eléctrico	- 30.320 €
	1010	Mediano	2	21	VW	Daily	Diesel	- 99.288 €
	1011	Mediano	3	22	Nissan	Daily	Diesel	- 99.288 €
	1015	Mediano	3	23	Nissan	Daily	Diesel	- 99.288 €
	1017	Mediano	3	24	Nissan	Daily	Diesel	- 99.288 €
2026	1503	Mediano	1	25	Iveco	Daily	Diesel	- 99.288 €
	1518	Mediano	2	26	VW	Daily	Diesel	- 99.288 €
	1523	Mediano	3	27	Nissan	Daily	Diesel	- 99.288 €
	1536	Mediano	3	28	Nissan	Daily	Diesel	- 99.288 €
	1537	Mediano	2	29	VW	Daily	Diesel	- 99.288 €
	1539	Mediano	1	30	Iveco	Daily	Diesel	- 99.288 €
2027	775	Grande	3	31	Volta	TGM	Diesel	- 163.814 €
	1019	Pequeño	1	32	Citroen	e-Jumpy	Eléctrico	- 29.344 €
	1517	Mediano	1	33	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 100.145 €
	1613	Mediano	1	34	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 100.145 €
	1614	Mediano	3	35	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 100.145 €
	1623	Mediano	2	36	VW	E-Daily	Eléctrico	- 100.145 €
2028	1703	Mediano	1	37	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 98.407 €
	1709	Mediano	3	38	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 98.407 €
	1717	Mediano	2	39	VW	E-Daily	Eléctrico	- 98.407 €
	1721	Mediano	1	40	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 98.407 €
	1724	Mediano	2	41	VW	E-Daily	Eléctrico	- 98.407 €
	1734	Pequeño	3	42	Renault	e-Jumpy	Eléctrico	- 28.910 €
2029	1533	Mediano	1	43	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 96.788 €
	1635	Mediano	1	44	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 96.788 €
	1733	Pequeño	2	45	Seat	e-Jumpy	Eléctrico	- 28.505 €
	1805	Mediano	3	46	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 96.788 €
	1815	Mediano	3	47	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 96.788 €
	1816	Mediano	3	48	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 96.788 €
2030	1731	Mediano	2	49	VW	E-Daily	Eléctrico	- 95.275 €
	1809	Mediano	3	50	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 95.275 €
	1810	Mediano	1	51	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 95.275 €
	1817	Mediano	3	52	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 95.275 €
	1932	Mediano	3	53	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 95.275 €
	1950	Mediano	3	54	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 95.275 €

La siguiente tabla es un resumen anual del estudio económico del caso base. En ella se muestra lo que la empresa debe invertir en NPV cada año del estudio, así como la distribución del coste total en cada uno de los años. Cabe destacar que el NPV a gastar cada año varía entre un 8% y un 12% del total. Esto es muy bueno para la empresa ya que tendrá una partida de presupuestos relativamente constante a lo largo de los 9 años del estudio, variando entre los 392.286,82€ y los 595.730,38€. La empresa podrá cumplir con la reducción de emisiones deseada teniendo un plan constante de recambio de la flota y sin tener sobresaltos de gasto entre un año y otro, haciendo que el cash flow disponible de la compañía sea muy oscilante.

Tabla 27: Simulación 1: Resumen de los resultados del estudio económico

Año	NPV Año	NPV Acumulado	% NPV	% NPV Acumulado
2022	- 456.179 €	- 456.179 €	9%	9%
2023	- 392.287 €	- 848.465 €	8%	18%
2024	- 591.839 €	- 1.440.304 €	12%	30%
2025	- 591.287 €	- 2.031.592 €	12%	42%
2026	- 595.730 €	- 2.627.322 €	12%	54%
2027	- 593.028 €	- 3.220.350 €	12%	67%
2028	- 520.947 €	- 3.741.297 €	11%	78%
2029	- 512.447 €	- 4.253.744 €	11%	88%
2030	- 571.651 €	- 4.825.394 €	12%	100%

El NPV total del estudio son - 4.825.394,43 € que, sin ser la solución más económica para la empresa, logra obtener la reducción de emisiones de CO₂ requerida por la empresa y la Unión Europea con un gasto adicional asumible.

3.4.3 Estudio Medioambiental

Los resultados del estudio medioambiental de la simulación del caso base se analizarán en este apartado. El usuario que utiliza la herramienta tiene la posibilidad de obtener resultados ambientales más detallados de los que se muestran aquí. Las siguientes tablas y gráficas muestran resumidamente los resultados más relevantes de la simulación.

En primer lugar, se muestran dos gráficas donde en el eje Y se muestra el % de reducción de emisiones total del estudio y en el eje X el NPV total del estudio. La diferencia entre la gráfica situada a la izquierda y la situada a la derecha es la siguiente. La gráfica de la izquierda representa el NPV dual de la solución, es decir, incluyendo el precio sombra (λ) dado a las emisiones de cada vehículo, mientras que la gráfica de la derecha muestra el NPV real de la simulación.

Como se ha explicado en la metodología, se hace uso del precio sombra para las emisiones de CO₂ para poder incluir las restricciones de emisiones en la función objetivo del coste total del estudio. Todos los puntos representados en la misma línea horizontal corresponden a la misma combinación de vehículos, pero tienen distintos NPV debido a que λ varía su valor en cada iteración. Sin embargo, en la gráfica de la derecha los puntos se superponen ya que, al no tener en cuenta el precio sombra, tienen el mismo NPV total.

Analizando el gráfico, se saca la conclusión que, para aumentar la reducción de emisiones, el gasto que debe hacer la empresa es desproporcionadamente mayor. En el caso base, Loomis desea tener una reducción del 50% de las emisiones y, es por ello que en el gráfico de la izquierda las iteraciones (los puntos) se concentran en esa zona de reducción.

El modo de simulación marcado ha sido “escoger la solución necesariamente mayor al objetivo requerido”, por ello la solución óptima tiene una reducción del 54%, mientras que la anterior tiene una reducción entorno al 47,5%. Sin embargo, la diferencia en el NPV total del estudio es mínima, alrededor de los 5.000 €. Si la diferencia económica entre las dos soluciones fuese muy grande, el usuario podría realizar otra vez la simulación cambiando el modo de funcionamiento a “escoger la solución más cercana al objetivo” que le hubiera escrito los resultados de la solución del 47,5% de reducción al estar a un 3% del objetivo y la otra solución a un 4%.

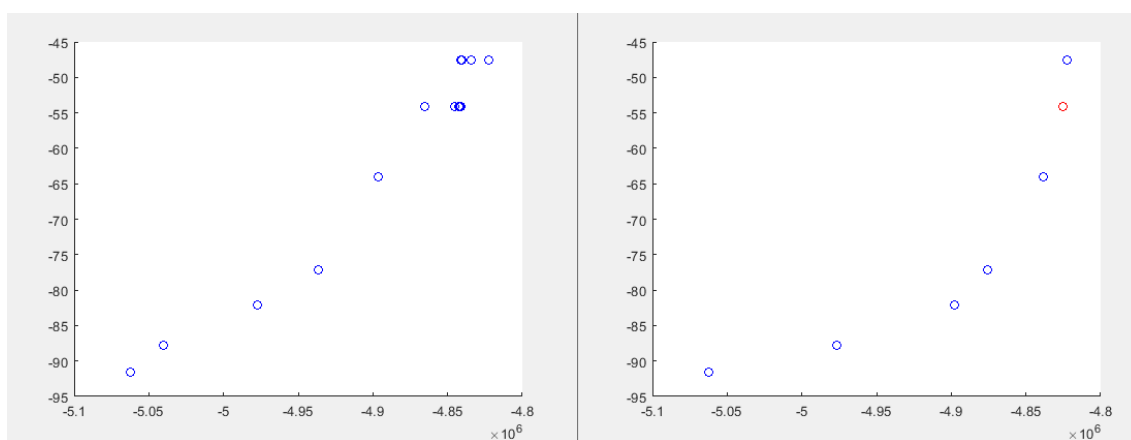


Figura 18: Simulación 1: Gráfico de dispersión de las distintas soluciones

La siguiente tabla muestra un resumen de las emisiones de todos los vehículos que componen la flota cada año. Se observa como poco a poco las emisiones, medidas en toneladas de CO₂, van disminuyendo a lo largo de los años del estudio. Sin embargo, cabe destacar que, en el 2026, al haber introducido todos los vehículos de tipo diésel, no ha habido reducción de emisiones durante ese año.

A medida que pasan los años del estudio, se incorporan más vehículos eléctricos y, por tanto, la reducción de emisiones es mayor. Esto se observa claramente ya que la reducción de emisiones en los 7 primeros años es del 25,34% mientras en los 3 siguientes es del 28,78%.

Tabla 28: Simulación 1: Resumen de los resultados del estudio medioambiental

Año	Emisiones Año	% Reducción Emisiones
2021	886278	0,00%
2022	816355	7,89%
2023	762218	14,00%
2024	747734	15,63%
2025	733065	17,29%
2026	737300	16,81%
2027	661702	25,34%
2028	569298	35,77%
2029	493400	44,33%
2030	406662	54,12%

La simulación del caso base de Loomis termina con una reducción total de emisiones en 9 años de estudio del -54,12% superando en más de 4 puntos la reducción requerida en los parámetros del estudio (50%).

3.5 Simulación 2: Disminución del objetivo de reducción de emisiones al 30%

La segunda simulación que se ha considerado en la aplicación del caso de estudio es una relajación de las restricciones de emisiones. En ella, los objetivos medioambientales han disminuido, teniendo que alcanzar una reducción de emisiones en el 2030 del 30% en lugar del 50% anterior.

A priori, al ser una cifra menos exigente y, por tanto, más fácil de conseguir, habrá que incorporar menos vehículos eléctricos y se conseguirá una menor reducción de emisiones. A nivel económico, el resultado que se obtendrá deberá de tener un NPV total menor al del caso base, puesto que no habrá que elegir vehículos más caros para llegar a la reducción requerida.

3.5.1 Parámetros

Los parámetros que definen la simulación son los mismos que en la simulación del caso base, salvo que se ha cambiado el objetivo de reducción de emisiones del 50% al 30%, permaneciendo sin cambios el resto de variables.

Tabla 29: Simulación 2: Parámetros

Parámetros	
Nº Max Km	500000
Nº Max Años	15
Coeficiente para Km	0,5
Coeficiente para Edad	0,5
Tasa Reemplazo Compra	10,00%

Años Estimación	9
Año Actual	2021
Amortización	7
Precio Electricidad (€/kWh)	0,12
Precio Diésel (€/litro)	0,85
Emisiones CO2 (kg/litro)	2,65
Precio Emisiones (€/ton CO2)	82
Cambio en el IPC	1,4%
Impuestos	21%
Tasa de Retorno	7%
Objetivo Reducción Emisiones CO2	30%
Años Alquiler	5
Kilómetros Máximo Alquiler	200000
Modo de simulación	Reducción necesariamente mayor al objetivo

3.5.2 Estudio Económico

Al variar únicamente un parámetro medioambiental en esta simulación, los resultados del análisis económico de los vehículos del mercado no han variado con respecto a la simulación del caso base. Esto no quiere decir que el NPV total del estudio vaya a ser igual al de la anterior simulación, ya que en la obtención de la solución óptima, se tiene en cuenta la reducción de emisiones requerida por el usuario. Por ello, la combinación de vehículos para la solución óptima será diferente al tener que cumplir un objetivo de reducción diferente y, por tanto, el NPV total del estudio también lo será.

Tabla 30: Simulación 2: NPV de los vehículos del mercado

Año Estudio / Vehículo Mercado	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
1 -	99.288 € -	99.288 € -	99.288 € -	99.288 € -	99.288 € -	99.288 € -	99.288 € -	99.288 € -	99.288 € -
2 -	111.318 € -	108.663 € -	106.252 € -	104.046 € -	102.019 € -	100.145 € -	98.407 € -	96.788 € -	95.275 € -
3 -	35.197 € -	35.197 € -	35.197 € -	35.197 € -	35.197 € -	35.197 € -	35.197 € -	35.197 € -	35.197 € -
4 -	32.137 € -	31.474 € -	30.871 € -	30.320 € -	29.813 € -	29.344 € -	28.910 € -	28.505 € -	28.127 € -
5 -	163.814 € -	163.814 € -	163.814 € -	163.814 € -	163.814 € -	163.814 € -	163.814 € -	163.814 € -	163.814 € -
6 -	206.883 € -	201.795 € -	197.172 € -	192.945 € -	189.059 € -	185.469 € -	182.138 € -	179.035 € -	176.134 € -
7 -	99.288 € -	99.288 € -	99.288 € -	99.288 € -	99.288 € -	99.288 € -	99.288 € -	99.288 € -	99.288 € -
8 -	111.318 € -	108.663 € -	106.252 € -	104.046 € -	102.019 € -	100.145 € -	98.407 € -	96.788 € -	95.275 € -
9 -	35.197 € -	35.197 € -	35.197 € -	35.197 € -	35.197 € -	35.197 € -	35.197 € -	35.197 € -	35.197 € -
10 -	32.137 € -	31.474 € -	30.871 € -	30.320 € -	29.813 € -	29.344 € -	28.910 € -	28.505 € -	28.127 € -
11 -	163.814 € -	163.814 € -	163.814 € -	163.814 € -	163.814 € -	163.814 € -	163.814 € -	163.814 € -	163.814 € -
12 -	206.883 € -	201.795 € -	197.172 € -	192.945 € -	189.059 € -	185.469 € -	182.138 € -	179.035 € -	176.134 € -
13 -	99.288 € -	99.288 € -	99.288 € -	99.288 € -	99.288 € -	99.288 € -	99.288 € -	99.288 € -	99.288 € -
14 -	111.318 € -	108.663 € -	106.252 € -	104.046 € -	102.019 € -	100.145 € -	98.407 € -	96.788 € -	95.275 € -
15 -	35.197 € -	35.197 € -	35.197 € -	35.197 € -	35.197 € -	35.197 € -	35.197 € -	35.197 € -	35.197 € -
16 -	32.137 € -	31.474 € -	30.871 € -	30.320 € -	29.813 € -	29.344 € -	28.910 € -	28.505 € -	28.127 € -
17 -	163.814 € -	163.814 € -	163.814 € -	163.814 € -	163.814 € -	163.814 € -	163.814 € -	163.814 € -	163.814 € -
18 -	206.883 € -	201.795 € -	197.172 € -	192.945 € -	189.059 € -	185.469 € -	182.138 € -	179.035 € -	176.134 € -

Los vehículos a retirar de la flota cada año permanecen iguales para esta simulación, ya que los datos de la flota actual introducidos por el usuario no han variado de un caso a otro. Aunque los vehículos a retirar sean los mismos, los vehículos a incorporar en cada año del estudio pueden variar, ya que se debe de obtener la combinación de vehículos más barata para poder cumplir con el objetivo de reducción de emisiones impuesto en los parámetros del estudio.

Comparando la siguiente tabla con la del caso base, no se observan grandes diferencias, siendo prácticamente idénticos los reemplazos de cada año. La única diferencia se encuentra en el año 2027 en los vehículos de tamaño mediano. Cuatro de los seis vehículos retirados ese año de la flota son de este tamaño y en este estudio se ha sustituido por el vehículo diésel del mercado, mientras que en el caso base se habían incorporado vehículos eléctricos. Esta diferencia está marcada por el cambio en el objetivo de reducción de emisiones.

En esta simulación, la herramienta no está forzada a incorporar vehículos más caros con el fin de cumplir el objetivo de reducción. En la gráfica del análisis medioambiental se podrá ver que la solución óptima del estudio es la solución con el NPV mínimo, por lo que no hará falta incorporar vehículos más caros y con menos emisiones para cumplir el objetivo de reducción deseado. Por tanto, en el año 2027 elegirá los vehículos más económicos para sustituir a los retirados, siendo estos los coches diésel en el caso de un tamaño mediano. Sin embargo, en el caso base, al no llegar al objetivo marcado con la combinación de vehículos más económica, la herramienta debe incorporar vehículos más caros para alcanzar el objetivo de reducción de emisiones deseado.

Tabla 31: Simulación 2: Vehículos a retirar e incorporar en cada año del estudio

Año	Identificador	Tamaño	Ruta	Identificador	Marca	Modelo	Tipo	NPV
2022	760	Pequeño	3	1	Renault	e-Jumpy	Eléctrico	- 32.137 €
	784	Pequeño	3	2	Renault	e-Jumpy	Eléctrico	- 32.137 €
	785	Pequeño	3	3	Renault	e-Jumpy	Eléctrico	- 32.137 €
	799	Grande	3	4	Volta	TGM	Diesel	- 163.814 €
	852	Grande	3	5	Volta	TGM	Diesel	- 163.814 €
	927	Pequeño	3	6	Renault	e-Jumpy	Eléctrico	- 32.137 €
2023	772	Pequeño	2	7	Seat	e-Jumpy	Eléctrico	- 31.474 €
	781	Pequeño	1	8	Citroen	e-Jumpy	Eléctrico	- 31.474 €
	809	Mediano	1	9	Iveco	Daily	Diesel	- 99.288 €
	811	Mediano	2	10	VW	Daily	Diesel	- 99.288 €
	882	Mediano	1	11	Iveco	Daily	Diesel	- 99.288 €
	893	Pequeño	2	12	Seat	e-Jumpy	Eléctrico	- 31.474 €
2024	793	Pequeño	1	13	Citroen	e-Jumpy	Eléctrico	- 30.871 €
	849	Grande	2	14	Tesla	TGM	Diesel	- 163.814 €
	856	Mediano	1	15	Iveco	Daily	Diesel	- 99.288 €
	884	Mediano	3	16	Nissan	Daily	Diesel	- 99.288 €
	900	Mediano	3	17	Nissan	Daily	Diesel	- 99.288 €
	964	Mediano	2	18	VW	Daily	Diesel	- 99.288 €
2025	822	Grande	1	19	MAN	TGM	Diesel	- 163.814 €
	929	Pequeño	2	20	Seat	e-Jumpy	Eléctrico	- 30.320 €
	1010	Mediano	2	21	VW	Daily	Diesel	- 99.288 €
	1011	Mediano	3	22	Nissan	Daily	Diesel	- 99.288 €
	1015	Mediano	3	23	Nissan	Daily	Diesel	- 99.288 €
	1017	Mediano	3	24	Nissan	Daily	Diesel	- 99.288 €
2026	1503	Mediano	1	25	Iveco	Daily	Diesel	- 99.288 €
	1518	Mediano	2	26	VW	Daily	Diesel	- 99.288 €
	1523	Mediano	3	27	Nissan	Daily	Diesel	- 99.288 €
	1536	Mediano	3	28	Nissan	Daily	Diesel	- 99.288 €
	1537	Mediano	2	29	VW	Daily	Diesel	- 99.288 €
	1539	Mediano	1	30	Iveco	Daily	Diesel	- 99.288 €
2027	775	Grande	3	31	Volta	TGM	Diesel	- 163.814 €
	1019	Pequeño	1	32	Citroen	e-Jumpy	Eléctrico	- 29.344 €
	1517	Mediano	1	33	Iveco	Daily	Diesel	- 99.288 €
	1613	Mediano	1	34	Iveco	Daily	Diesel	- 99.288 €
	1614	Mediano	3	35	Nissan	Daily	Diesel	- 99.288 €
	1623	Mediano	2	36	VW	Daily	Diesel	- 99.288 €
2028	1703	Mediano	1	37	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 98.407 €
	1709	Mediano	3	38	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 98.407 €
	1717	Mediano	2	39	VW	E-Daily	Eléctrico	- 98.407 €
	1721	Mediano	1	40	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 98.407 €
	1724	Mediano	2	41	VW	E-Daily	Eléctrico	- 98.407 €
	1734	Pequeño	3	42	Renault	e-Jumpy	Eléctrico	- 28.910 €
2029	1533	Mediano	1	43	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 96.788 €
	1635	Mediano	1	44	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 96.788 €
	1733	Pequeño	2	45	Seat	e-Jumpy	Eléctrico	- 28.505 €
	1805	Mediano	3	46	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 96.788 €
	1815	Mediano	3	47	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 96.788 €
	1816	Mediano	3	48	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 96.788 €
2030	1731	Mediano	2	49	VW	E-Daily	Eléctrico	- 95.275 €
	1809	Mediano	3	50	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 95.275 €
	1810	Mediano	1	51	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 95.275 €
	1817	Mediano	3	52	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 95.275 €
	1932	Mediano	3	53	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 95.275 €
	1950	Mediano	3	54	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 95.275 €

La siguiente tabla muestra de forma resumida el NPV de cada año del estudio. En ella, se observa cómo es el reparto del NPV en cada año del estudio, variando entre un mínimo de 392.286,82€ en 2023 y un máximo de 595.730,38€ en 2026. Estas cantidades representan entre el 8% y el 12% del NPV total del estudio, lo que indica que el coste que deberá hacer la empresa en cada año del estudio será casi constante, pudiendo planificar mejor las adquisiciones y disponer de un cash flow más estable para ser utilizado en otras partidas del presupuesto anual.

La única diferencia de NPV anual entre el caso base y este se encuentra en el año 2027. Esto se debe a la incorporación para automóviles de tamaño mediano de vehículos diésel en lugar de eléctricos al ser más económicos. El gasto durante el año 2027 en el caso base es de 593.027,98€ mientras que en esta simulación es de 590.312,29€, lo que supone una reducción del gasto del año de 2.715,69€. La diferencia en la reducción de emisiones se analizará en el siguiente apartado con el fin de valorar si este ahorro en el gasto compensa con la diferencia en la reducción de emisiones de cada simulación.

Tabla 32: Simulación 2: Resumen de los resultados del estudio económico

Año	NPV Año	NPV Acumulado	% NPV	% NPV Acumulado
2022	- 456.179 €	- 456.179 €	9%	9%
2023	- 392.287 €	- 848.465 €	8%	18%
2024	- 591.839 €	- 1.440.304 €	12%	30%
2025	- 591.287 €	- 2.031.592 €	12%	42%
2026	- 595.730 €	- 2.627.322 €	12%	54%
2027	- 590.312 €	- 3.217.634 €	12%	67%
2028	- 520.947 €	- 3.738.581 €	11%	78%
2029	- 512.447 €	- 4.251.028 €	11%	88%
2030	- 571.651 €	- 4.822.679 €	12%	100%

El NPV total del estudio son - 4.822.678,74 € siendo la solución más económica para la empresa y logrando obtener el objetivo de reducción de emisiones de CO₂ sin ningún gasto adicional. La diferencia con el caso base es de 2.715,69€ que proviene de la incorporación de vehículos diésel en vez de eléctricos en el año 2027 al no tener un objetivo de reducción de emisiones tan exigente como en el caso base.

3.5.3 Estudio Medioambiental

Tras haber analizado el estudio económico de la simulación, se procederá en este apartado con el estudio medioambiental. Esta simulación se diferencia del caso base debido a que el objetivo de reducción de emisiones ha disminuido del 50% al 30%. Como se ha podido comprobar en el apartado anterior, esta variación en el objetivo se ve reflejada en la incorporación de varios vehículos en la flota, elegidos por su menor NPV y no por sus bajas emisiones.

Tal y como se explicó en la metodología, la optimización del estudio trata de la iteración de un precio sombra (λ) relativo a las emisiones de CO₂ producidas por cada uno de los vehículos candidatos a entrar en la flota. Un valor más bajo de λ indica que se le da menos

valor a las emisiones y si se le da un valor mayor quiere decir que se le da mayor importancia a las emisiones.

La primera iteración de la optimización utiliza un valor λ igual a cero, lo que significa que solo se tiene en cuenta el NPV del vehículo para su elección y no sus emisiones. Si la reducción de emisiones de la primera iteración es mayor a la deseada por el usuario, la optimización se da por concluida, puesto que no puede haber una combinación con menor NPV que esta. Como se puede observar en las siguientes gráficas, solo está representado un punto en ellas. Esto quiere decir que el proceso de optimización solo ha realizado la primera iteración. El resultado que se obtiene es una reducción total de emisiones en los 9 años del estudio del 47,5%, siendo superior a la deseada por el usuario (30%).

Este punto representado coincide con el punto de menor NPV del caso base. Al haber variado únicamente el objetivo de reducción de emisiones, los NPV de los vehículos del mercado son los mismos que en el caso base. Por ello, las distintas soluciones que se consiguen tendrán el mismo NPV y reducción de emisiones que en el caso base, no así la solución óptima del estudio. En esta simulación, se ha elegido la solución de 47,5% de reducción ya que el objetivo marcado por el usuario era 30%, mientras que en el caso base esta solución no puede considerarse al encontrarse por debajo de la reducción de emisiones deseada por el usuario (50%).

Además, cabe destacar que la herramienta no ha encontrado ninguna solución con una reducción de emisiones más cercana a 30%. Esto se debe a que el usuario ha marcado una tasa de reemplazo anual de la flota del 10%, lo que supone retirar 6 vehículos cada año del estudio. Por ello, al tener que incorporar 6 vehículos cada año, la opción más económica es la elegida, aunque tenga una reducción considerablemente superior a la marcada por el usuario.

La tasa de reemplazo es un parámetro definido por el usuario y por ello la herramienta solo puede modificarlo para aumentarlo, nunca para disminuirlo. Si el valor se disminuyera, la empresa podría tener vehículos más antiguos de los deseados, mayores averías, etc. Probablemente, con una tasa de reemplazo menor, la herramienta pudiera encontrar una solución más cercana al 30% de reducción y con un NPV total menor al elegido.

Sin embargo, la herramienta permite aumentar la tasa de reemplazo si con la introducida por el usuario no es capaz de encontrar una solución que alcance la reducción de emisiones deseada. Esto se debe a que el objetivo de reducción de emisiones es la variable más importante para la herramienta y a la que se debe de llegar siempre en la solución óptima. Es decir, la solución más económica que se obtendría si no hubiera restricción de emisiones tendría una reducción de las mismas del 47%, solo un 3% menor que la solución del caso base.

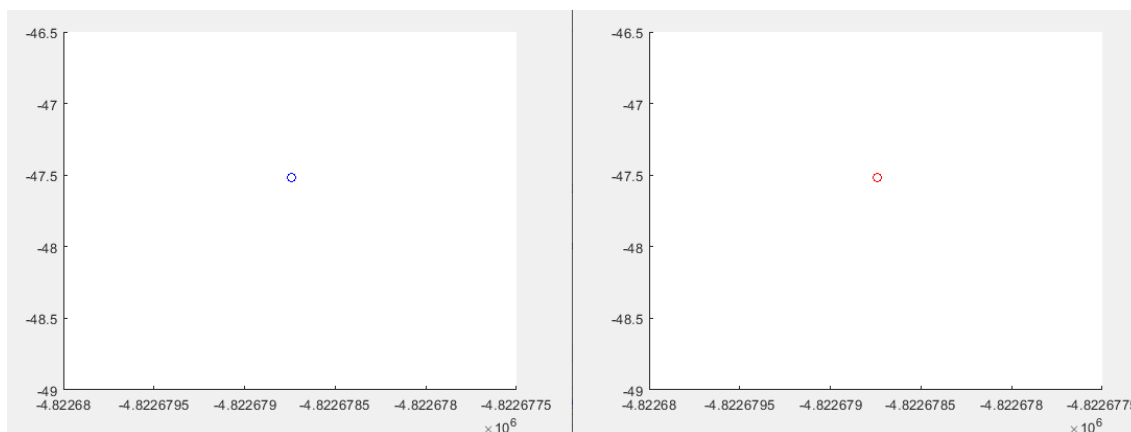


Figura 19: Simulación 2: Gráfico de dispersión de las distintas soluciones

La siguiente tabla muestra el resumen de las emisiones producidas por el conjunto de vehículos que componen la flota. En ella, se puede observar el tanto por ciento de emisiones que se reducen a lo largo del estudio. Del 47,52% que disminuyen en los 9 años del estudio, en los 6 primeros años solo se reduce un 18,74% mientras que en los 3 últimos años se reducen el 28,78% restante. Esto quiere decir que la mayor parte de la reducción ocurre durante los últimos años del estudio. En un análisis práctico, esta solución tendría sentido al tener la tecnología más desarrollada y los precios más económicos conforme transcurren los años del estudio.

Tabla 33: Simulación 2: Resumen de los resultados del estudio medioambiental

Año	Emisiones Año	% Reducción Emisiones
2021	886278	0,00%
2022	816355	7,89%
2023	762218	14,00%
2024	747734	15,63%
2025	733065	17,29%
2026	737300	16,81%
2027	720186	18,74%
2028	627782	29,17%
2029	551884	37,73%
2030	465147	47,52%

La simulación del caso base de Loomis termina con una reducción total de emisiones en 9 años de estudio del -47,52% superando en más de 17 puntos la reducción requerida en los parámetros del estudio (30%). Esta diferencia considerable en la producción de emisiones se debe a la tasa de reemplazo marcada por el usuario, ya que la solución mostrada es la más económica posible.

3.6 Simulación 3: El precio del diésel sube de 0,85€/litro a 1,2€/litro

La segunda simulación que se ha considerado en la aplicación del caso de estudio es una situación favorable para la electrificación de la flota. En ella, el precio del diésel aumenta de los 0,85€/litro a 1,20€/litro.

A priori, este aumento afectará a la parte económica del estudio. El NPV de los vehículos diésel aumentará considerablemente mientras que se mantendrá constante para los automóviles eléctricos al no modificarse el precio de la electricidad. A nivel económico, el resultado que se obtendrá deberá de tener un NPV total mayor al del caso base, puesto que los vehículos diésel que se incorporarán serán más caros en esta simulación. A nivel medioambiental, este cambio en el precio del diésel no debería tener ningún efecto en la reducción total de emisiones del estudio.

3.6.1 Parámetros

Los parámetros que definen la simulación son los mismos que en la simulación del caso base, salvo que se ha cambiado el precio del diésel de 0,85€/litro a 1,2€/litro. Este cambio supone un aumento del 40%, lo que supone un escenario extremo. Esta situación se podría dar por la escasez de la materia prima, baja demanda por el cambio a vehículos eléctricos o impuestos a carburantes que emitan CO₂.

El resto de parámetros del estudio han permanecido constantes para apreciar mejor como varía la solución de la simulación ante el cambio de una única variable, en este caso puramente económica.

Tabla 34: Simulación 3: Parámetros

Parámetros	
Nº Max Km	500000
Nº Max Años	15
Coeficiente para Km	0,5
Coeficiente para Edad	0,5
Tasa Reemplazo Compra	10,00%
Años Estimación	9
Año Actual	2021
Amortización	7
Precio Electricidad (€/kWh)	0,12
Precio Diésel (€/litro)	1,2
Emisiones CO2 (kg/litro)	2,65
Precio Emisiones (€/ton CO2)	82
Cambio en el IPC	1,4%
Impuestos	21%
Tasa de Retorno	7%
Objetivo Reducción Emisiones CO2	50%
Años Alquiler	5

Kilómetros Máximo Alquiler	200000
Modo de simulación	Reducción necesariamente mayor al objetivo

3.6.2 Estudio Económico

La diferencia de esta simulación con el caso base se encuentra en el cambio del precio del diésel. Este cambio en el parámetro afecta solamente al análisis económico de los vehículos del mercado, ya que no se modifican los consumos de los vehículos ni la producción de CO₂ por cada litro de diésel consumido.

Al afectar a los cálculos del análisis económico para los vehículos del mercado, los NPV de cada uno de ellos son diferentes al del caso base. En esta simulación, al haber aumentado el precio del diésel, solo variarán los NPV de los vehículos con motores térmicos, es decir, los de índice impar. Los automóviles con tecnología eléctrica no se verán afectados por este aumento en el precio puesto que ellos utilizan la electricidad para mover su motor eléctrico.

Al aumentar el precio del diésel, el cost of ownership de los vehículos con motor térmico aumentará puesto que el gasto de combustible para los mismos kilómetros será mayor. Como se puede apreciar en la siguiente tabla, los NPV de los vehículos diésel han aumentado mientras que los de los coches eléctricos no. Esta variación repercute directamente en el proceso de optimización de la simulación, puesto que la paridad entre las distintas tecnologías se alcanzará antes ahora que en el caso base.

Tabla 35: Simulación 3: NPV de los vehículos del mercado

Año Estudio / Vehículo Mercado	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
1 -	107.831 €	107.831 €	107.831 €	107.831 €	107.831 €	107.831 €	107.831 €	107.831 €	107.831 €
2 -	111.318 €	108.663 €	106.252 €	104.046 €	102.019 €	100.145 €	98.407 €	96.788 €	95.275 €
3 -	40.079 €	40.079 €	40.079 €	40.079 €	40.079 €	40.079 €	40.079 €	40.079 €	40.079 €
4 -	32.137 €	31.474 €	30.871 €	30.320 €	29.813 €	29.344 €	28.910 €	28.505 €	28.127 €
5 -	173.578 €	173.578 €	173.578 €	173.578 €	173.578 €	173.578 €	173.578 €	173.578 €	173.578 €
6 -	206.883 €	201.795 €	197.172 €	192.945 €	189.059 €	185.469 €	182.138 €	179.035 €	176.134 €
7 -	107.831 €	107.831 €	107.831 €	107.831 €	107.831 €	107.831 €	107.831 €	107.831 €	107.831 €
8 -	111.318 €	108.663 €	106.252 €	104.046 €	102.019 €	100.145 €	98.407 €	96.788 €	95.275 €
9 -	40.079 €	40.079 €	40.079 €	40.079 €	40.079 €	40.079 €	40.079 €	40.079 €	40.079 €
10 -	32.137 €	31.474 €	30.871 €	30.320 €	29.813 €	29.344 €	28.910 €	28.505 €	28.127 €
11 -	173.578 €	173.578 €	173.578 €	173.578 €	173.578 €	173.578 €	173.578 €	173.578 €	173.578 €
12 -	206.883 €	201.795 €	197.172 €	192.945 €	189.059 €	185.469 €	182.138 €	179.035 €	176.134 €
13 -	107.831 €	107.831 €	107.831 €	107.831 €	107.831 €	107.831 €	107.831 €	107.831 €	107.831 €
14 -	111.318 €	108.663 €	106.252 €	104.046 €	102.019 €	100.145 €	98.407 €	96.788 €	95.275 €
15 -	40.079 €	40.079 €	40.079 €	40.079 €	40.079 €	40.079 €	40.079 €	40.079 €	40.079 €
16 -	32.137 €	31.474 €	30.871 €	30.320 €	29.813 €	29.344 €	28.910 €	28.505 €	28.127 €
17 -	173.578 €	173.578 €	173.578 €	173.578 €	173.578 €	173.578 €	173.578 €	173.578 €	173.578 €
18 -	206.883 €	201.795 €	197.172 €	192.945 €	189.059 €	185.469 €	182.138 €	179.035 €	176.134 €

El hecho de que la paridad se alcance antes se traducirá en que será económicamente mejor comprar un vehículo eléctrico que uno diésel desde varios años antes que en el caso base. Por ejemplo, para el vehículo 1, diésel, y vehículo 2, eléctrico, la paridad se encontraba entre el año 2027 y 2028 en el caso base y, en esta simulación, se sitúa entre el año 2023 y 2024. Esto significa que, en el año 2025 del estudio, para un vehículo de esa categoría es más económico incorporar un vehículo eléctrico en esta simulación y en el caso base uno diésel.

Los vehículos a retirar de la flota cada año permanecen iguales para esta simulación, ya que los datos de la flota actual introducidos por el usuario no han variado de un caso a otro. Aunque los vehículos a retirar sean los mismos, los vehículos a incorporar en cada

año del estudio pueden variar, ya que se debe de obtener la combinación de vehículos más barata para poder cumplir con el objetivo de reducción de emisiones impuesto en los parámetros del estudio y, al haber cambiado el precio del diésel, esta combinación puede variar.

En la siguiente tabla se pueden observar los vehículos que se han de incorporar a la flota para cada año del estudio. Comparando esta tabla con la del caso base, se pueden encontrar grandes diferencias en los vehículos que se han de incorporar. La diferencia más grande se encuentra en la sustitución de los vehículos medianos, al haber alcanzado la paridad antes que en el caso base. Por ello, los vehículos de esta categoría que se adquieren a partir de 2024 son eléctricos en esta simulación, mientras que en el caso base eran diésel.

Que el precio del diésel haya subido no significa que el NPV total del estudio haya disminuido si no al contrario. Al haber aumentado el precio del combustible hace que aumente el NPV de los vehículos con motor técnico, sin que aumenten los automóviles eléctricos. Por ello, en esta simulación se escogen más vehículos eléctricos y menos diésel, que son más caros, que en el caso base son más baratos.

Un ejemplo podría ser el vehículo que sustituye al coche 1010 de la flota en el año 2025. El vehículo que se incorporaría en el caso base tiene un NPV de 99.288,40€ con tecnología diésel. En esta simulación, el vehículo escogido es eléctrico con un NPV de 104.046,23€. Sin embargo, el vehículo diésel en esta simulación tiene un NPV de 107.831,47€. Por tanto, el NPV de la incorporación de este vehículo en esta simulación es más caro que en el caso base.

Como resumen, en esta simulación se han de incorporar más vehículos eléctricos no para cumplir con la reducción de emisiones si no por qué son más económicos que los diésel. Esto hará que el NPV total del estudio sea superior pero también se obtendrá una mayor reducción de emisiones al finalizar el estudio.

Más adelante se analizará qué efectos puede tener este cambio en la reducción total de emisiones, ya que, a priori deberán de incorporarse más vehículos eléctricos que en el caso base.

Tabla 36: Simulación 3: Vehículos a retirar e incorporar en cada año del estudio

Año	Identificador	Tamaño	Ruta	Identificador Nuevo	Marca	Modelo	Tipo	NPV
2022	760	Pequeño	3	1	Renault	e-Jumpy	Eléctrico	- 32.137 €
	784	Pequeño	3	2	Renault	e-Jumpy	Eléctrico	- 32.137 €
	785	Pequeño	3	3	Renault	e-Jumpy	Eléctrico	- 32.137 €
	799	Grande	3	4	Volta	TGM	Diesel	- 173.578 €
	852	Grande	3	5	Volta	TGM	Diesel	- 173.578 €
	927	Pequeño	3	6	Renault	e-Jumpy	Eléctrico	- 32.137 €
2023	772	Pequeño	2	7	Seat	e-Jumpy	Eléctrico	- 31.474 €
	781	Pequeño	1	8	Citroen	e-Jumpy	Eléctrico	- 31.474 €
	809	Mediano	1	9	Iveco	Daily	Diesel	- 107.831 €
	811	Mediano	2	10	VW	Daily	Diesel	- 107.831 €
	882	Mediano	1	11	Iveco	Daily	Diesel	- 107.831 €
	893	Pequeño	2	12	Seat	e-Jumpy	Eléctrico	- 31.474 €
2024	793	Pequeño	1	13	Citroen	e-Jumpy	Eléctrico	- 30.871 €
	849	Grande	2	14	Tesla	TGM	Diesel	- 173.578 €
	856	Mediano	1	15	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 106.252 €
	884	Mediano	3	16	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 106.252 €
	900	Mediano	3	17	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 106.252 €
	964	Mediano	2	18	VW	E-Daily	Eléctrico	- 106.252 €
2025	822	Grande	1	19	MAN	TGM	Diesel	- 173.578 €
	929	Pequeño	2	20	Seat	e-Jumpy	Eléctrico	- 30.320 €
	1010	Mediano	2	21	VW	E-Daily	Eléctrico	- 104.046 €
	1011	Mediano	3	22	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 104.046 €
	1015	Mediano	3	23	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 104.046 €
	1017	Mediano	3	24	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 104.046 €
2026	1503	Mediano	1	25	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 102.019 €
	1518	Mediano	2	26	VW	E-Daily	Eléctrico	- 102.019 €
	1523	Mediano	3	27	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 102.019 €
	1536	Mediano	3	28	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 102.019 €
	1537	Mediano	2	29	VW	E-Daily	Eléctrico	- 102.019 €
	1539	Mediano	1	30	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 102.019 €
2027	775	Grande	3	31	Volta	TGM	Diesel	- 173.578 €
	1019	Pequeño	1	32	Citroen	e-Jumpy	Eléctrico	- 29.344 €
	1517	Mediano	1	33	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 100.145 €
	1613	Mediano	1	34	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 100.145 €
	1614	Mediano	3	35	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 100.145 €
	1623	Mediano	2	36	VW	E-Daily	Eléctrico	- 100.145 €
2028	1703	Mediano	1	37	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 98.407 €
	1709	Mediano	3	38	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 98.407 €
	1717	Mediano	2	39	VW	E-Daily	Eléctrico	- 98.407 €
	1721	Mediano	1	40	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 98.407 €
	1724	Mediano	2	41	VW	E-Daily	Eléctrico	- 98.407 €
	1734	Pequeño	3	42	Renault	e-Jumpy	Eléctrico	- 28.910 €
2029	1533	Mediano	1	43	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 96.788 €
	1635	Mediano	1	44	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 96.788 €
	1733	Pequeño	2	45	Seat	e-Jumpy	Eléctrico	- 28.505 €
	1805	Mediano	3	46	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 96.788 €
	1815	Mediano	3	47	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 96.788 €
	1816	Mediano	3	48	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 96.788 €
2030	1731	Mediano	2	49	VW	E-Daily	Eléctrico	- 95.275 €
	1809	Mediano	3	50	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 95.275 €
	1810	Mediano	1	51	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 95.275 €
	1817	Mediano	3	52	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 95.275 €
	1932	Mediano	3	53	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 95.275 €
	1950	Mediano	3	54	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 95.275 €

La siguiente tabla muestra de forma resumida el NPV de cada año del estudio. En ella, se observa como es el reparto del NPV en cada año del estudio, variando entre un mínimo de 417.916,03€ en 2023 y un máximo de 629.455,14€ en 2024. Estas cantidades representan entre el 8% y el 13% del NPV total del estudio, lo que indica que el coste que

deberá hacer la empresa en cada año del estudio será casi constante, pudiendo planificar mejor las adquisiciones y disponer de un cash flow más estable para ser utilizado en otras partidas del presupuesto anual.

El NPV de cada año del estudio es superior al del caso base en los 6 primeros años. Esto se debe a dos razones principalmente:

1. Los vehículos diésel incorporados a la flota tienen un NPV mayor al que tienen en el caso base.
2. Se han incorporado vehículos eléctricos en vez de coches diésel ya que tienen un NPV menor que estos, pero mayor que en el caso base.

Tabla 37: Simulación 3: Resumen de los resultados del estudio económico

Año	NPV Año	NPV Acumulado	% NPV	% NPV Acumulado
2022	- 475.706 €	- 475.706 €	10%	10%
2023	- 417.916 €	- 893.622 €	8%	18%
2024	- 629.455 €	- 1.523.077 €	13%	31%
2025	- 620.082 €	- 2.143.159 €	12%	43%
2026	- 612.112 €	- 2.755.271 €	12%	56%
2027	- 603.504 €	- 3.358.775 €	12%	68%
2028	- 520.947 €	- 3.879.721 €	10%	78%
2029	- 512.447 €	- 4.392.169 €	10%	88%
2030	- 571.651 €	- 4.963.819 €	12%	100%

El NPV total del estudio son - 4.963.819,26 € siendo la solución más económica para la empresa y logrando obtener la reducción de emisiones de CO₂ requerida por la empresa y la Unión Europea. La diferencia con el caso base es de 138.424,83 € que proviene de la incorporación de vehículos eléctricos en vez eléctricos al haber aumentado el precio del diésel con respecto al caso base.

3.6.3 Estudio Medioambiental

Como se ha comentado en el apartado económico, el hecho de subir el precio del diésel hace que sea más económico elegir vehículos eléctricos que diésel antes en el estudio. Por ello, la solución con el NPV total mínimo contiene mayor cantidad de vehículos eléctricos a incorporar que en el caso base. Esto se traduce en el estudio medioambiental a una mayor reducción de emisiones para la solución con NPV mínimo.

Tal y como se explicó en la metodología, la optimización del estudio trata de la iteración de un precio sombra (λ) relativo a las emisiones de CO₂ producidas por cada uno de los vehículos candidatos a entrar en la flota. Un valor más bajo de λ indica que se le da menos valor a las emisiones y si se le da un valor mayor quiere decir que se le da mayor importancia a las emisiones.

La primera iteración de la optimización utiliza un valor λ igual a cero, lo que significa que solo se tiene en cuenta el NPV del vehículo para su elección y no sus emisiones. Si

la reducción de emisiones de la primera iteración es mayor a la deseada por el usuario, la optimización se da por concluida, puesto que no puede haber una combinación con menor NPV que esta. Como se puede observar en las siguientes gráficas, solo está representado un punto en ellas. Esto quiere decir que el proceso de optimización solo ha realizado la primera iteración. El resultado que se obtiene es una reducción total de emisiones en los 9 años del estudio del 77,21%, siendo superior a la deseada por el usuario (50%).

Además, cabe destacar que la herramienta no ha encontrado ninguna solución con una reducción de emisiones más cercana a 50%. Esto se debe a que el usuario ha marcado una tasa de reemplazo anual de la flota del 10%, lo que supone retirar 6 vehículos cada año del estudio. Por ello, al tener que incorporar 6 vehículos cada año, la opción más económica es la elegida, aunque tenga una reducción considerablemente superior a la marcada por el usuario.

La tasa de reemplazo es un parámetro definido por el usuario y por ello la herramienta solo puede modificarlo para aumentarlo, nunca para disminuirlo. Si el valor se disminuyera, la empresa podría tener vehículos más antiguos de los deseados, mayores averías, etc. Probablemente, con una tasa de reemplazo menor, la herramienta pudiera encontrar una solución más cercana al 50% de reducción y con un NPV total menor al elegido.

Sin embargo, la herramienta permite aumentar la tasa de reemplazo si con la introducida por el usuario no es capaz de encontrar una solución que alcance la reducción de emisiones deseada. Esto se debe a que el objetivo de reducción de emisiones es la variable más importante para la herramienta y a la que se debe de llegar siempre en la solución óptima.

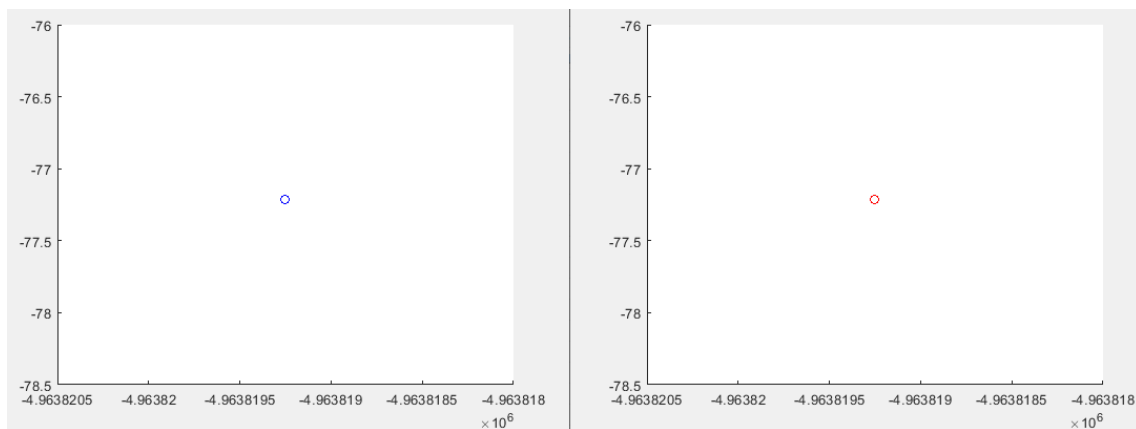


Figura 20: Simulación 3: Gráfico de dispersión de las distintas soluciones

La siguiente tabla muestra el resumen de las emisiones producidas por el conjunto de vehículos que componen la flota. En ella, se puede observar el tanto por ciento de emisiones que se reducen a lo largo del estudio. Cada año del estudio se reduce un 8,5% de emisiones aproximadamente, siendo constante a lo largo del mismo. Esta reducción de emisiones constante puede facilitar al cumplimiento de objetivos intermedios del estudio que se marque la compañía, al no estar toda la reducción de emisiones concentrada en los últimos años del estudio.

Tabla 38: Simulación 3: Resumen de los resultados del estudio medioambiental

Año	Emisiones Año	% Reducción Emisiones
2021	886278	0,00%
2022	816355	7,89%
2023	762218	14,00%
2024	689250	22,23%
2025	616096	30,49%
2026	532604	39,91%
2027	457006	48,44%
2028	364602	58,86%
2029	288704	67,43%
2030	201967	77,21%

La simulación del caso base de Loomis termina con una reducción total de emisiones en 9 años de estudio del -77,21% superando en más de 27 puntos la reducción requerida en los parámetros del estudio (50%). Esta diferencia considerable en la producción de emisiones se debe a la tasa de reemplazo marcada por el usuario, ya que la solución mostrada es la más económica posible. El aumento relativo de los costes de explotación de los vehículos convencionales hace que se alcance el objetivo de reducción de emisiones sin necesidad de forzar las restricciones de emisión.

3.7 Simulación 4: La duración del estudio disminuye de 9 años a 6 años

Esta simulación pretende recrear una situación desfavorable en el estudio. En este caso, la empresa debería de alcanzar la reducción de emisiones en el 2027 en lugar del 2030. Este caso podría ser realidad si se llegara a un punto crítico de emisiones producidas o si la población estuviera más concienciada y hubiera mayor presión social.

A priori, esta reducción de los años de estudio afectará a la parte medioambiental del estudio. Al tener que cumplir con la misma reducción de emisiones en menos años, se tendrán que incorporar más vehículos de bajas emisiones aunque esto suponga un mayor gasto total. A nivel económico, el resultado que se obtendrá deberá de tener un NPV total proporcionalmente mayor al del caso base, puesto que se incorporarán más automóviles eléctricos siendo más caros que los diésel. A nivel medioambiental, se obtendrá una reducción total de emisiones del estudio mayor que el 50% aunque sea con un gasto total mayor proporcionalmente.

3.7.1 Parámetros

Los parámetros que definen la simulación son los mismos que en la simulación del caso base, salvo que se ha cambiado los años de estudio de 9 a 6 años. Este cambio supone conseguir la misma reducción de emisiones en 2/3 del tiempo del caso de estudio. Esta

simulación sería un escenario exigente para la compañía donde la mayoría de vehículos a incorporar serán eléctricos para disminuir las emisiones considerablemente.

El resto de parámetros del estudio han permanecido constantes para apreciar mejor como varía la solución de la simulación ante el cambio de una única variable, en este caso puramente económica.

Tabla 39: Simulación 4: Parámetros

Parámetros	
Nº Max Km	500000
Nº Max Años	15
Coficiente para Km	0,5
Coficiente para Edad	0,5
Tasa Reemplazo Compra	10,00%
Años Estimación	6
Año Actual	2021
Amortización	7
Precio Electricidad (€/kWh)	0,12
Precio Diésel (€/litro)	0,85
Emisiones CO2 (kg/litro)	2,65
Precio Emisiones (€/ton CO2)	82
Cambio en el IPC	1,4%
Impuestos	21%
Tasa de Retorno	7%
Objetivo Reducción Emisiones CO2	50%
Años Alquiler	5
Kilómetros Máximo Alquiler	200000
Modo de simulación	Reducción necesariamente mayor al objetivo

3.7.2 Estudio Económico

En esta simulación se disminuirá el tiempo del estudio de 9 a 6 años. Esto no tendrá ninguna implicación en los resultados del análisis económico de los vehículos del mercado. Por ello, la siguiente tabla será igual que a la del caso base, siendo la única diferencia los años del estudio ya que esta simulación acaba en 2027 y no 2030.

En el caso base, los vehículos medianos alcanzaban la paridad económica entre los diésel y los eléctricos entre el año 2027 y 2028. En este caso, como se puede observar en la tabla, en ningún año del estudio el NPV del vehículo mediano eléctrico es menor que el diésel, por lo que no se alcanza la paridad económica a lo largo del estudio.

Tabla 40: Simulación 4: NPV de los vehículos del mercado

Año Estudio / Vehículo Mercado	2022	2023	2024	2025	2026	2027
1 -	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €
2 -	111.318 €	108.663 €	106.252 €	104.046 €	102.019 €	100.145 €
3 -	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €
4 -	32.137 €	31.474 €	30.871 €	30.320 €	29.813 €	29.344 €
5 -	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €
6 -	206.883 €	201.795 €	197.172 €	192.945 €	189.059 €	185.469 €
7 -	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €
8 -	111.318 €	108.663 €	106.252 €	104.046 €	102.019 €	100.145 €
9 -	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €
10 -	32.137 €	31.474 €	30.871 €	30.320 €	29.813 €	29.344 €
11 -	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €
12 -	206.883 €	201.795 €	197.172 €	192.945 €	189.059 €	185.469 €
13 -	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €
14 -	111.318 €	108.663 €	106.252 €	104.046 €	102.019 €	100.145 €
15 -	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €
16 -	32.137 €	31.474 €	30.871 €	30.320 €	29.813 €	29.344 €
17 -	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €
18 -	206.883 €	201.795 €	197.172 €	192.945 €	189.059 €	185.469 €

Durante la simulación se retiran de la flota 6 vehículos cada año, un total de 36 vehículos en total. En el caso base, al ser 9 años de estudio, se reemplazan 54 vehículos a lo largo del estudio. Los vehículos que se retiran de la flota cada año son los mismos que los 6 primeros años del caso base ya que no se ha modificado ningún valor actual y los coeficientes de reemplazo de los vehículos siguen siendo iguales.

Como se ha explicado, los NPV de los vehículos candidatos a incorporarse son los mismos que en el caso base. Por ello, la opción más económica sería la misma en ambos casos, incorporando a la flota los vehículos más económicos en cada caso. Sin embargo, en esta simulación, al tener un objetivo de reducción de emisiones exigente en pocos años, la solución elegirá incorporar vehículos de bajas emisiones aunque sean más caros que otros.

En la siguiente tabla se pueden observar los vehículos a retirar e incorporar de la flota. De los 36 vehículos a incorporar solo 5 son diésel mientras que los otros 31 restantes son eléctricos. Esto se debe a la necesidad de introducir vehículos de bajas emisiones para conseguir alcanzar la reducción de emisiones requerida por el usuario. Los 5 vehículos diésel que se han incorporado son los de tamaño grande debido a la gran diferencia de precio entre automóviles con motor térmico y eléctrico para esta categoría.

Por ejemplo, para el año 2024, el NPV de un vehículo mediano diésel es de 99.288,40 € y para uno eléctrico es de 106.251,59 €, siendo una diferencia de 6.963,19 €. Para el mismo año, el NPV de un vehículo grande diésel es de 163.814,35 € y para uno eléctrico es de 197.172,38 €, siendo una diferencia de 90.920,79 €. Debido a ello, la herramienta determina que, al necesitar vehículos de bajas emisiones, es mejor incorporar un coche mediano eléctrico en lugar de uno grande eléctrico porque la diferencia en el NPV total del estudio es menor.

Tabla 41: Simulación 4: Vehículos a retirar e incorporar en cada año del estudio

Año	Identificador	Tamaño	Ruta	Identificador	Marca	Modelo	Tipo	NPV
2022	760	Pequeño	3	1	Renault	e-Jumpy	Eléctrico	- 32.137 €
	784	Pequeño	3	2	Renault	e-Jumpy	Eléctrico	- 32.137 €
	785	Pequeño	3	3	Renault	e-Jumpy	Eléctrico	- 32.137 €
	799	Grande	3	4	Volta	TGM	Diesel	- 163.814 €
	852	Grande	3	5	Volta	TGM	Diesel	- 163.814 €
	927	Pequeño	3	6	Renault	e-Jumpy	Eléctrico	- 32.137 €
2023	772	Pequeño	2	7	Seat	e-Jumpy	Eléctrico	- 31.474 €
	781	Pequeño	1	8	Citroen	e-Jumpy	Eléctrico	- 31.474 €
	809	Mediano	1	9	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 108.663 €
	811	Mediano	2	10	VW	E-Daily	Eléctrico	- 108.663 €
	882	Mediano	1	11	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 108.663 €
	893	Pequeño	2	12	Seat	e-Jumpy	Eléctrico	- 31.474 €
2024	793	Pequeño	1	13	Citroen	e-Jumpy	Eléctrico	- 30.871 €
	849	Grande	2	14	Tesla	TGM	Diesel	- 163.814 €
	856	Mediano	1	15	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 106.252 €
	884	Mediano	3	16	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 106.252 €
	900	Mediano	3	17	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 106.252 €
	964	Mediano	2	18	VW	E-Daily	Eléctrico	- 106.252 €
2025	822	Grande	1	19	MAN	TGM	Diesel	- 163.814 €
	929	Pequeño	2	20	Seat	e-Jumpy	Eléctrico	- 30.320 €
	1010	Mediano	2	21	VW	E-Daily	Eléctrico	- 104.046 €
	1011	Mediano	3	22	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 104.046 €
	1015	Mediano	3	23	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 104.046 €
	1017	Mediano	3	24	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 104.046 €
2026	1503	Mediano	1	25	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 102.019 €
	1518	Mediano	2	26	VW	E-Daily	Eléctrico	- 102.019 €
	1523	Mediano	3	27	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 102.019 €
	1536	Mediano	3	28	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 102.019 €
	1537	Mediano	2	29	VW	E-Daily	Eléctrico	- 102.019 €
	1539	Mediano	1	30	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 102.019 €
2027	775	Grande	3	31	Volta	TGM	Diesel	- 163.814 €
	1019	Pequeño	1	32	Citroen	e-Jumpy	Eléctrico	- 29.344 €
	1517	Mediano	1	33	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 100.145 €
	1613	Mediano	1	34	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 100.145 €
	1614	Mediano	3	35	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 100.145 €
	1623	Mediano	2	36	VW	E-Daily	Eléctrico	- 100.145 €

La siguiente tabla muestra de forma resumida el NPV de cada año del estudio. En ella, se observa como es el reparto del NPV en cada año del estudio, variando entre un mínimo de 414.567,02 € en 2023 y un máximo de 613.903,16 € en 2024. Estas cantidades representan entre el 13% y el 19% del NPV total del estudio, lo que indica que el coste que deberá hacer la empresa en cada año del estudio será menor en los dos primeros años del estudio y mayor en los 4 posteriores con cantidades similares.

Si se compara la tabla con la del caso base, se puede observar que el gasto en cada uno de los estudios es siempre mayor o igual que la del caso base, puesto que es necesario hacer un mayor gasto en los 6 vehículos que se incorporan anualmente para introducir un vehículo que no genere emisiones.

Tabla 42: Simulación 4: Resumen de los resultados del estudio económico

Año	NPV Año	NPV Acumulado	% NPV	% NPV Acumulado
2022	- 456.179 €	- 456.179 €	14%	14%
2023	- 414.567 €	- 870.746 €	13%	26%
2024	- 613.903 €	- 1.484.649 €	19%	45%
2025	- 606.364 €	- 2.091.012 €	18%	64%
2026	- 608.707 €	- 2.699.720 €	18%	82%
2027	- 593.028 €	- 3.292.748 €	18%	100%

El NPV total del estudio son 3.292.747,76 € siendo la solución más económica para la empresa y logrando obtener la reducción de emisiones de CO₂ requerida por la empresa y la Unión Europea. El NPV de los 6 primeros años del caso base es de 3.220.350,03 € que, si se compara con el NPV total de esta simulación, la diferencia entre ambos es de 72.397,73 €. Por tanto, la empresa debería de gastar 72.397,73 € si quiere cumplir el objetivo de reducción de emisiones del 50% en el año 2027 en lugar del año 2030.

3.7.3 Estudio Medioambiental

El estudio medioambiental de esta simulación viene marcado por la exigencia de cumplir con el objetivo de reducción de emisiones en 6 años en lugar de 9 años. Esto quiere decir que se incorporarán menos vehículos a la flota y, por tanto, la reducción de emisiones de las distintas combinaciones de vehículos será menor que en el caso base.

En primer lugar, se muestran dos gráficas donde en el eje Y se muestra el % de reducción de emisiones total del estudio y en el eje X el NPV total del estudio. La diferencia entre la gráfica situada a la izquierda y la situada a la derecha es la siguiente. La gráfica de la izquierda representa el NPV dual de la solución, es decir, incluyendo el precio sombra (λ) dado a las emisiones de cada vehículo, mientras que la gráfica de la derecha muestra el NPV real de la simulación.

Como se ha explicado en la metodología, se hace uso del precio sombra para las emisiones de CO₂ para poder incluir las restricciones de emisiones en la función objetivo del coste total del estudio. Es por ello por lo que, todos los puntos representados en la misma línea horizontal corresponden a la misma combinación de vehículos, pero tienen distintos NPV debido a que λ varía su valor en cada iteración. Sin embargo, en la gráfica de la derecha los puntos se superponen ya que, al no tener en cuenta el precio sombra, tienen el mismo NPV total.

La primera iteración del proceso se realiza con λ igual a 0, por lo que no se tienen en cuenta las emisiones de los vehículos. Esta solución será la que tenga el menor NPV del estudio y, en esta simulación, alcanza solamente el 15% de emisiones.

La segunda iteración de la optimización se realiza con λ igual a 1.000.000, lo que significa que los vehículos elegidos serán seleccionados únicamente por sus emisiones, al haber dado un valor realmente grande al precio sombra. Por tanto, esta solución incorporará

todos los vehículos de estudio a vehículos eléctricos siendo la solución con la mayor reducción de emisiones, alcanzando la cifra de 63,5%.

A través de iteraciones, la solución óptima tiene una reducción total de 53,38%. Analizando el gráfico, podemos sacar la conclusión que, si se quiere llegar a una reducción de emisiones mayor, el gasto que debe hacer la empresa es mucho mayor. Por ejemplo, si en lugar de una reducción del 50% se quisiera una del 63,5%, la empresa deberá gastar más de 150.000 € más.

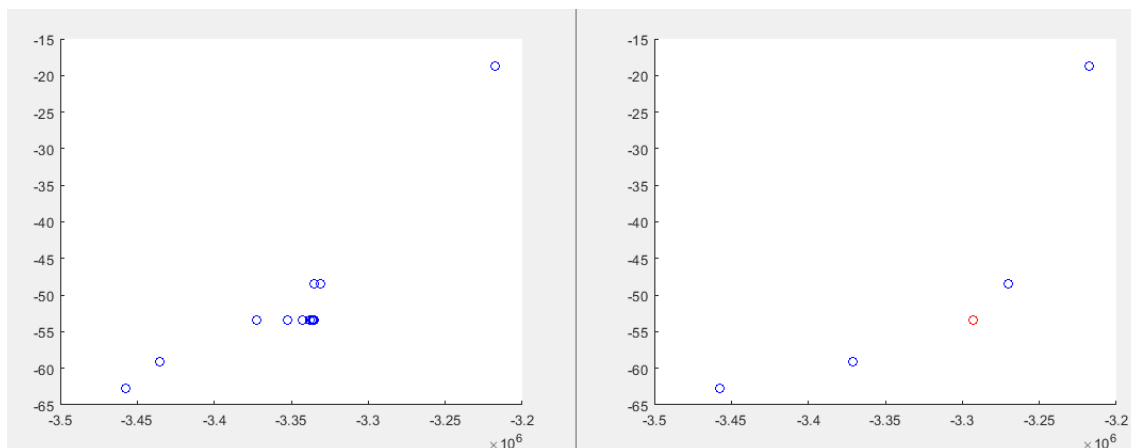


Figura 21: Simulación 4: Gráfico de dispersión de las distintas soluciones

La siguiente tabla muestra el resumen de las emisiones producidas por el conjunto de vehículos que componen la flota. En ella, se puede observar el tanto por ciento de emisiones que se reducen a lo largo del estudio. Cada año del estudio se reduce un 8,9% de emisiones aproximadamente, siendo constante a lo largo del mismo. Esta reducción de emisiones constante puede facilitar al cumplimiento de objetivos intermedios del estudio que se marque la compañía, al no estar toda la reducción de emisiones concentrada en los últimos años del estudio.

Tabla 43: Simulación 4: Resumen de los resultados del estudio medioambiental

Año	Emisiones Año	% Reducción Emisiones
2021	886278	0,00%
2022	816355	7,89%
2023	718355	18,95%
2024	645386	27,18%
2025	572233	35,43%
2026	488740	44,85%
2027	413142	53,38%

La simulación termina con una reducción total de emisiones en 6 años de estudio del 53,38% superando en más de 3 puntos la reducción requerida en los parámetros del estudio (50%). En comparación con el caso base, esta solución es más cercana a la del caso base (54,12%).

3.8 Simulación 5: El precio de la electricidad aumenta de 0,12€/kWh a 0,2€/kWh

Esta simulación tratará el escenario en el cual ha habido una subida en el precio de la electricidad. Esta subida puede deberse a varios factores como puede ser la introducción de una gran cantidad de estaciones de carga y vehículos eléctricos en la sociedad. Por ello, se analizará cómo afecta esta variación en el precio a la solución dada por la herramienta en comparación con el caso base.

Antes de analizar los resultados de la simulación, se va a comentar brevemente los resultados que se esperarían obtener. Al haber aumentado el precio de la electricidad, el cost of ownership de los vehículos eléctricos en el mercado será mayor ya que costará más moverse con automóviles de esta tecnología. Debido a esto, la solución con NPV mínimo tendrá menos vehículos eléctricos que en el caso base y, por tanto, menor reducción de emisiones al final del estudio. Como el objetivo de reducción de emisiones no ha variado, sigue en un 50%, la herramienta tendrá que incorporar vehículos de bajas emisiones a la flota aunque sea más caro que en el caso base.

En conclusión, se deberían de obtener unos resultados con un NPV mayor que el caso base para poder conseguir la misma reducción de emisiones.

3.8.1 Parámetros

Los parámetros que ha introducido el usuario y que la herramienta leerá para su utilización durante la simulación son los siguientes. Se puede observar que, todos los parámetros permanecen constantes respecto al caso base salvo el precio de la electricidad que ha aumenta de 0,12€/kWh a 0,2€/kWh. Esta subida supone un 66,66% de incremento respecto al caso base, y puede estar provocada por factores tales como:

- Aumento del precio en materias primas para la generación de electricidad
- Aumento de impuestos por parte del gobierno
- Aumento de vehículos eléctricos e infraestructuras de carga

El resto de parámetros del estudio han permanecido constantes para apreciar mejor como varía la solución de la simulación ante el cambio de una única variable, en este caso puramente económica.

Tabla 44: Simulación 5: Parámetros

Parámetros	
Nº Max Km	500000
Nº Max Años	15
Coeficiente para Km	0,5
Coeficiente para Edad	0,5
Tasa Reemplazo Compra	10,00%
Años Estimación	9
Año Actual	2021
Amortización	7

Precio Electricidad (€/kWh)	0,2
Precio Diésel (€/litro)	0,85
Emisiones CO2 (kg/litro)	2,65
Precio Emisiones (€/ton CO2)	82
Cambio en el IPC	1,4%
Impuestos	21%
Tasa de Retorno	7%
Objetivo Reducción Emisiones CO2	50%
Años Alquiler	5
Kilómetros Máximo Alquiler	200000
Modo de simulación	Reducción necesariamente mayor al objetivo

3.8.2 Estudio Económico

En este apartado se explicarán los resultados económicos obtenidos en esta simulación. Además, se analizarán para entender el porqué de estos resultados según la metodología anteriormente explicada.

El único parámetro que ha variado en esta simulación con respecto al caso base es el precio de la electricidad. Este parámetro es económico y, como se ha explicado, afectará en el análisis económico de los vehículos del mercado que utilicen esta tecnología, es decir, automóviles eléctricos. Los NPV de estos vehículos aumentarán debido a que la forma que utilizan para moverse depende de la electricidad.

La siguiente tabla muestra los NPV de todos los vehículos del mercado. Los vehículos impares son vehículos diésel mientras que los pares son coches eléctricos. Comparando esta tabla con la del caso base, se puede observar como los NPV de los vehículos diésel no han variado mientras que los NPV de los automóviles eléctricos sí. Un ejemplo claro de esta variación se puede encontrar en el vehículo eléctrico de tamaño mediano, índice número 2, el cual ha pasado en el año 2022 de un NPV de 111.317,82 € a 115.781,14 €, lo que supone un incremento de 4.463,32 €, es decir, un 4% de su valor.

Debido a la subida del precio de la electricidad, los NPV de los vehículos eléctricos han aumentado y, por tanto, la paridad entre las dos tecnologías cada vez se encuentra más lejos. Para los vehículos de tamaño pequeño, índices 3 y 4, en el caso base la paridad económica se alcanzaba desde el inicio del estudio, es decir, entre el año 2021 y 2022. En esta simulación, con el aumento del NPV de los vehículos eléctricos, la paridad se alcanza entre el año 2022 y 2023. Esto quiere decir que si se quisiera incorporar un vehículo pequeño a la flota en el año 2022, la opción más económica sería un automóvil diésel mientras que en el caso base era un coche eléctrico.

Por otro lado, para los vehículos medianos, índice 1 y 2, la paridad económica en el caso base se alcanza entre los años 2027 y 2028. Debido al incremento del precio, el NPV del vehículo eléctrico, índice 2, ha aumentado, haciendo que la paridad entre las tecnologías para esta categoría se dé entre el año 2030 y 2031, fuera de los años del estudio. Por tanto, en todos los años del estudio será más económico comprar un vehículo mediano diésel que uno eléctrico.

Tabla 45: Simulación 5: NPV de los vehículos del mercado

Año Estudio / Vehículo Mercado	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
1	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €
2	115.781 €	113.127 €	110.715 €	108.510 €	106.482 €	104.609 €	102.871 €	101.252 €	99.738 €
3	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €
4	35.485 €	34.821 €	34.218 €	33.667 €	33.160 €	32.692 €	32.257 €	31.853 €	31.474 €
5	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €
6	212.462 €	207.374 €	202.752 €	198.525 €	194.638 €	191.048 €	187.717 €	184.614 €	181.713 €
7	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €
8	115.781 €	113.127 €	110.715 €	108.510 €	106.482 €	104.609 €	102.871 €	101.252 €	99.738 €
9	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €
10	35.485 €	34.821 €	34.218 €	33.667 €	33.160 €	32.692 €	32.257 €	31.853 €	31.474 €
11	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €
12	212.462 €	207.374 €	202.752 €	198.525 €	194.638 €	191.048 €	187.717 €	184.614 €	181.713 €
13	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €
14	115.781 €	113.127 €	110.715 €	108.510 €	106.482 €	104.609 €	102.871 €	101.252 €	99.738 €
15	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €
16	35.485 €	34.821 €	34.218 €	33.667 €	33.160 €	32.692 €	32.257 €	31.853 €	31.474 €
17	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €
18	212.462 €	207.374 €	202.752 €	198.525 €	194.638 €	191.048 €	187.717 €	184.614 €	181.713 €

La siguiente tabla muestra los vehículos que se han de retirar e incorporar cada año del estudio. Los vehículos a retirar siguen siendo los mismos que en el caso base puesto que el cálculo de los coeficientes de los automóviles de la flota sigue siendo el mismo. Por otro lado, los vehículos a incorporar no tendrían por qué ser iguales que en el caso base, ya que ha aumentado el NPV de los vehículos eléctricos. Sin embargo, en esta simulación, los vehículos que se han de incorporar a la flota son los mismos que en el caso base ya que es necesario conseguir la misma reducción de emisiones.

Si se hubiera indicado un objetivo de reducción de emisiones bajo, casi todos los vehículos a incorporar serían diésel puesto que son más económicos que los eléctricos. No obstante, al tener la misma reducción de emisiones que el caso base (50%), se deben incorporar más vehículos de bajas emisiones aunque esto conlleve mayor gasto para la empresa.

Los vehículos a incorporarse a la flota son iguales que el caso base pero los NPV de estos son distintos. Por ejemplo, el primer vehículo incorporado tiene un NPV de 35.484,95 € y en el caso base era de 32.137,46 €. Para los automóviles diésel el cost of ownership sigue siendo el mismo que en el caso base ya que el aumento del precio de la electricidad no afecta a los coches con motores térmicos.

Por tanto, teniendo la misma combinación de vehículos a incorporar pero con un mayor cost of ownership, se concluye que se conseguirán la misma reducción de emisiones pero con un NPV total mayor.

Tabla 46: Simulación 5: Vehículos a retirar e incorporar en cada año del estudio

Año	Identificador	Tamaño	Ruta	Identificador Nuevo	Marca	Modelo	Tipo	NPV
2022	760	Pequeño	3	1	Renault	e-Jumpy	Eléctrico	- 35.485 €
	784	Pequeño	3	2	Renault	e-Jumpy	Eléctrico	- 35.485 €
	785	Pequeño	3	3	Renault	e-Jumpy	Eléctrico	- 35.485 €
	799	Grande	3	4	Volta	TGM	Diesel	- 163.814 €
	852	Grande	3	5	Volta	TGM	Diesel	- 163.814 €
	927	Pequeño	3	6	Renault	e-Jumpy	Eléctrico	- 35.485 €
2023	772	Pequeño	2	7	Seat	e-Jumpy	Eléctrico	- 34.821 €
	781	Pequeño	1	8	Citroen	e-Jumpy	Eléctrico	- 34.821 €
	809	Mediano	1	9	Iveco	Daily	Diesel	- 99.288 €
	811	Mediano	2	10	VW	Daily	Diesel	- 99.288 €
	882	Mediano	1	11	Iveco	Daily	Diesel	- 99.288 €
	893	Pequeño	2	12	Seat	e-Jumpy	Eléctrico	- 34.821 €
2024	793	Pequeño	1	13	Citroen	e-Jumpy	Eléctrico	- 34.218 €
	849	Grande	2	14	Tesla	TGM	Diesel	- 163.814 €
	856	Mediano	1	15	Iveco	Daily	Diesel	- 99.288 €
	884	Mediano	3	16	Nissan	Daily	Diesel	- 99.288 €
	900	Mediano	3	17	Nissan	Daily	Diesel	- 99.288 €
	964	Mediano	2	18	VW	Daily	Diesel	- 99.288 €
2025	822	Grande	1	19	MAN	TGM	Diesel	- 163.814 €
	929	Pequeño	2	20	Seat	e-Jumpy	Eléctrico	- 33.667 €
	1010	Mediano	2	21	VW	Daily	Diesel	- 99.288 €
	1011	Mediano	3	22	Nissan	Daily	Diesel	- 99.288 €
	1015	Mediano	3	23	Nissan	Daily	Diesel	- 99.288 €
	1017	Mediano	3	24	Nissan	Daily	Diesel	- 99.288 €
2026	1503	Mediano	1	25	Iveco	Daily	Diesel	- 99.288 €
	1518	Mediano	2	26	VW	Daily	Diesel	- 99.288 €
	1523	Mediano	3	27	Nissan	Daily	Diesel	- 99.288 €
	1536	Mediano	3	28	Nissan	Daily	Diesel	- 99.288 €
	1537	Mediano	2	29	VW	Daily	Diesel	- 99.288 €
	1539	Mediano	1	30	Iveco	Daily	Diesel	- 99.288 €
2027	775	Grande	3	31	Volta	TGM	Diesel	- 163.814 €
	1019	Pequeño	1	32	Citroen	e-Jumpy	Eléctrico	- 32.692 €
	1517	Mediano	1	33	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 104.609 €
	1613	Mediano	1	34	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 104.609 €
	1614	Mediano	3	35	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 104.609 €
	1623	Mediano	2	36	VW	E-Daily	Eléctrico	- 104.609 €
2028	1703	Mediano	1	37	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 102.871 €
	1709	Mediano	3	38	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 102.871 €
	1717	Mediano	2	39	VW	E-Daily	Eléctrico	- 102.871 €
	1721	Mediano	1	40	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 102.871 €
	1724	Mediano	2	41	VW	E-Daily	Eléctrico	- 102.871 €
	1734	Pequeño	3	42	Renault	e-Jumpy	Eléctrico	- 32.257 €
2029	1533	Mediano	1	43	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 101.252 €
	1635	Mediano	1	44	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 101.252 €
	1733	Pequeño	2	45	Seat	e-Jumpy	Eléctrico	- 31.853 €
	1805	Mediano	3	46	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 101.252 €
	1815	Mediano	3	47	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 101.252 €
	1816	Mediano	3	48	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 101.252 €
2030	1731	Mediano	2	49	VW	E-Daily	Eléctrico	- 99.738 €
	1809	Mediano	3	50	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 99.738 €
	1810	Mediano	1	51	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 99.738 €
	1817	Mediano	3	52	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 99.738 €
	1932	Mediano	3	53	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 99.738 €
	1950	Mediano	3	54	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 99.738 €

La siguiente tabla es un resumen anual del estudio económico del caso base. En ella se muestra lo que la empresa debe invertir en NPV cada año del estudio, así como la distribución del coste total en cada uno de los años. Cabe destacar que el NPV a gastar cada año varía entre un 8% y un 12% del total. Esto es muy bueno para la empresa ya que tendrá una partida de presupuestos relativamente constante a lo largo de los 9 años del estudio, variando entre los 402.329,28€ y los 611.715,32€. La empresa podrá cumplir con

la reducción de emisiones deseada teniendo un plan constante de recambio de la flota y sin tener sobresaltos de gasto entre un año y otro, haciendo que se descontrole el cash flow disponible de la compañía.

Comparando la tabla con el caso base, se puede observar como todos los años del estudio se tiene un valor absoluto de NPV mayor que en el caso base. Cabe destacar el año 2026 ya que es el único que tiene el mismo NPV que en la simulación inicial. Esto se debe a que ese año todos los vehículos que se han de incorporar son diésel en ambos estudios por lo que el NPV de los automóviles es el mismo y también el total de ese año.

Tabla 47: Simulación 5: Resumen de los resultados del estudio económico

Año	NPV Año	NPV Acumulado	% NPV	% NPV Acumulado
2022	- 469.568 €	- 469.568 €	9%	9%
2023	- 402.329 €	- 871.898 €	8%	18%
2024	- 595.186 €	- 1.467.084 €	12%	30%
2025	- 594.635 €	- 2.061.719 €	12%	42%
2026	- 595.730 €	- 2.657.449 €	12%	54%
2027	- 611.715 €	- 3.269.165 €	12%	66%
2028	- 543.896 €	- 3.813.060 €	11%	77%
2029	- 536.623 €	- 4.349.684 €	11%	88%
2030	- 598.021 €	- 4.947.705 €	12%	100%

El NPV total del estudio son - 4.947.704,88 € que, sin ser la solución más económica para la empresa, logra obtener la reducción de emisiones de CO₂ requerida por la empresa y la Unión Europea. La diferencia con el caso base es de 122.310,45 € que proviene de la incorporación de vehículos eléctricos más caros que en el caso base por el aumento del precio de la electricidad pero necesarios para cumplir con el objetivo de reducción de emisiones marcado.

3.8.3 Estudio Medioambiental

Tras haber analizado los resultados económicos de la simulación, se hará lo mismo con los resultados medioambientales. Para ello se mostrarán distintas gráficas y tablas que representan el proceso de optimización y los resultados finales de emisiones de CO₂ y porcentaje de reducción de emisiones a lo largo del estudio.

En primer lugar, se muestran dos gráficas donde en el eje Y se muestra el % de reducción de emisiones total del estudio y en el eje X el NPV total del estudio. La diferencia entre la gráfica situada a la izquierda y la situada a la derecha es la siguiente. La gráfica de la izquierda representa el NPV dual de la solución, es decir, incluyendo el precio sombra (λ) dado a las emisiones de cada vehículo, mientras que la gráfica de la derecha muestra el NPV real de la simulación.

Como se ha explicado en la metodología, se hace uso del precio sombra para las emisiones de CO₂ para poder incluir las restricciones de emisiones en la función objetivo del coste total del estudio. Es por ello por lo que, todos los puntos representados en la misma línea

horizontal corresponden a la misma combinación de vehículos, pero tienen distintos NPV debido a que λ varía su valor en cada iteración. Sin embargo, en la gráfica de la derecha los puntos se superponen ya que, al no tener en cuenta el precio sombra, tienen el mismo NPV total.

La primera iteración del proceso se realiza con λ igual a 0, por lo que no se tienen en cuenta las emisiones de los vehículos. Esta solución será la que tenga el menor NPV del estudio y, en esta simulación, alcanza solamente el 16% de emisiones. Al haber aumentado el precio de la electricidad, la paridad de las tecnologías se alcanza más tarde por lo que la opción más económica es incorporar vehículos diésel en lugar de eléctricos. Por ello, la primera iteración estará formada casi por completo por vehículos diésel, dando como resultado una reducción total de emisiones muy baja.

La segunda iteración de la optimización se realiza con λ igual a 1.000.000, lo que significa que los vehículos elegidos serán seleccionados únicamente por sus emisiones, al haber dado un valor realmente grande al precio sombra. Por tanto, esta solución incorporará todos vehículos eléctricos siendo la solución con la mayor reducción de emisiones, alcanzando la cifra de 92%.

A través de iteraciones, la solución óptima tiene una reducción total de 54,12%. Esta reducción es la misma que el caso base ya que, como se ha podido comprobar, los vehículos a incorporar a lo largo del estudio son los mismos en ambos casos. Sin embargo, el NPV total de la solución no es la misma, siendo en esta simulación mayor como se ha explicado en el análisis de los resultados económicos.

Comparando las gráficas de ambos estudios, se pueden observar varias diferencias. La primera es la solución con el NPV más bajo siendo en esta simulación el 16% y en la del caso base un 46%. Esto se debe a que en el caso base se tenía una combinación con NPV mínimo que incluía más vehículos eléctricos ya que la paridad entre las tecnologías se alcanzaba antes. En esta simulación, la paridad se alcanza después y, por tanto, en la solución con el mínimo NPV habrá muchos más vehículos diésel que harán tener una menor reducción de emisiones.

Por otro lado, la solución con la mayor reducción de emisiones tiene el mismo valor para ambos estudios. Esto sucede porque las dos soluciones tendrían los mismos vehículos incorporados al ser todos ellos coches eléctricos. No obstante, el NPV total del estudio es distinto debido a la subida del precio de la electricidad que en este caso afectaría a todos los vehículos incorporados. Este incremento en el precio supone una diferencia económica entre ambas soluciones de 230.000 €.

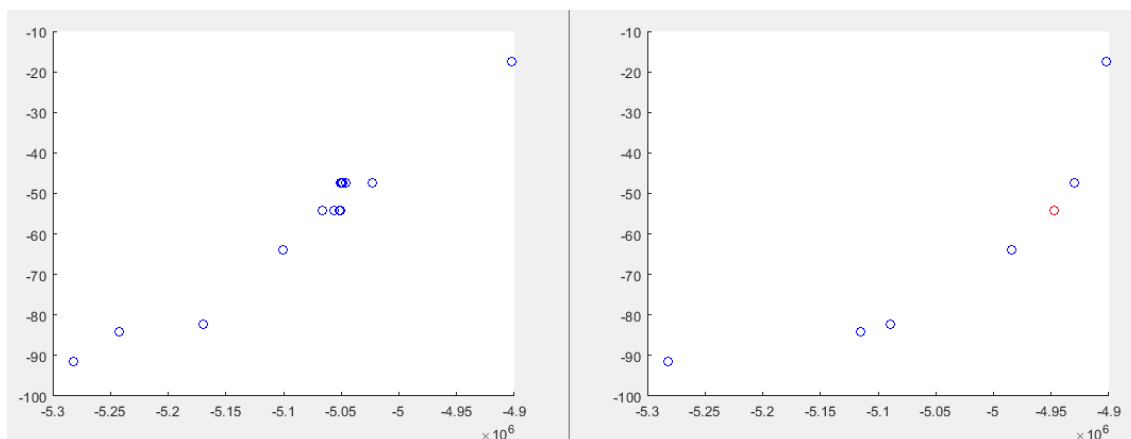


Figura 22: Simulación 5: Gráfico de dispersión de las distintas soluciones

La siguiente tabla muestra un resumen de las emisiones de todos los vehículos que componen la flota cada año. Se observa como poco a poco las emisiones, medidas en toneladas de CO₂, van disminuyendo a lo largo de los años del estudio. Sin embargo, cabe destacar que, en el 2026, al haber introducido todos los vehículos de tipo diésel, no ha habido reducción de emisiones durante ese año.

A medida que pasan los años del estudio, se incorporan más vehículos eléctricos y, por tanto, la reducción de emisiones es mayor. Esto se observa claramente ya que la reducción de emisiones en los 7 primeros años es del 25,34% mientras en los 3 siguientes es del 28,78%.

Los resultados de la tabla resumen son los mismos que en el caso base puesto que el mix de vehículos que se ha de incorporar es igual en ambos casos. Por tanto, en esta simulación no varía la reducción de emisiones conseguida sino solamente el NPV total del estudio ya que se ha variado un parámetro puramente económico.

Tabla 48: Simulación 5: Resumen de los resultados del estudio medioambiental

Año	Emisiones Año	% Reducción Emisiones
2021	886278	0,00%
2022	816355	7,89%
2023	762218	14,00%
2024	747734	15,63%
2025	733065	17,29%
2026	737300	16,81%
2027	661702	25,34%
2028	569298	35,77%
2029	493400	44,33%
2030	406662	54,12%

La simulación del caso base de Loomis termina con una reducción total de emisiones en 9 años de estudio del -54,12% superando en más de 4 puntos la reducción requerida en los parámetros del estudio (50%).

3.9 Simulación 6: La tasa de reemplazo se reduce del 10% al 5%

Esta simulación pretende recrear el escenario en el que Loomis tuviese o decidiese tener una tasa de reemplazo del 5%. Esta disminución supondría una reducción del 50% con respecto al caso base en la cual se tenía una tasa de reemplazo del 10%. En una flota de 60 vehículos como es este caso, supondrá que cada año se tendrán que retirar 3 vehículos en vez de los 6 del caso base.

A priori, este cambio hará que la flota esté más envejecida y tenga más problemas de averías, costes de mantenimiento mayores, etc. A nivel de estudio, será más complicado lograr el objetivo de reducción de emisiones puesto que se necesita alcanzar el mismo valor (50%) con la mitad de vehículos nuevos incorporados a lo largo del estudio.

3.9.1 Parámetros

A continuación se muestra una tabla con los distintos parámetros de la simulación. En comparación con el caso base, el único cambio que se observa es la tasa de reemplazo para los vehículos comprados. Este parámetro pasa de valer un 10% al 5% lo que supone que cada año se cambiarán 3 automóviles en lugar de los 6 del caso base. En la totalidad del estudio, supondrá incorporar 27 vehículos a la flota durante los 9 años en lugar de los 54 vehículos que se compraban en la primera simulación.

El resto de parámetros del estudio han permanecido constantes para apreciar mejor como varía la solución de la simulación ante el cambio de una única variable, en este caso puramente económica.

Tabla 49: Simulación 6: Parámetros

Nº Max Km	500000
Nº Max Años	15
Coeficiente para Km	0,5
Coeficiente para Edad	0,5
Tasa Reemplazo Compra	5,00%
Años Estimación	9
Año Actual	2021
Precio Electricidad (€/kWh)	0,12
Precio Diésel (€/litro)	0,85
Emisiones CO2 (kg/litro)	2,65
Precio Emisiones (€/ton CO2)	82
Cambio en el IPC	1,4%
Impuestos	21%
Tasa de Retorno	7%
Objetivo Reducción Emisiones CO2	50%
Años Alquiler	5
Kilómetros Máximo Alquiler	200000
Modo de simulación	Reducción necesariamente mayor al objetivo

3.9.2 Estudio Económico

Una vez realizada la simulación con los parámetros introducidos por el usuario, se procede a analizar los resultados obtenidos. A continuación se expondrán todos los resultados relevantes del estudio económico.

En primer lugar, la siguiente tabla muestra los NPV de los vehículos del mercado. Este resultado se obtiene del análisis económico que se hace a los automóviles candidatos a incorporarse a la flota y que se detalla en el capítulo de la metodología. En esta simulación, el parámetro de la tasa de reemplazo no afecta al cálculo del NPV por lo que la información de esta tabla es exactamente igual que en el caso base.

Tabla 50: Simulación 6: NPV de los vehículos del mercado

Año Estudio / Vehículo Mercado	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
1 -	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €
2 -	111.318 €	108.663 €	106.252 €	104.046 €	102.019 €	100.145 €	98.407 €	96.788 €	95.275 €
3 -	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €
4 -	32.137 €	31.474 €	30.871 €	30.320 €	29.813 €	29.344 €	28.910 €	28.505 €	28.127 €
5 -	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €
6 -	206.883 €	201.795 €	197.172 €	192.945 €	189.059 €	185.469 €	182.138 €	179.035 €	176.134 €
7 -	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €
8 -	111.318 €	108.663 €	106.252 €	104.046 €	102.019 €	100.145 €	98.407 €	96.788 €	95.275 €
9 -	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €
10 -	32.137 €	31.474 €	30.871 €	30.320 €	29.813 €	29.344 €	28.910 €	28.505 €	28.127 €
11 -	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €
12 -	206.883 €	201.795 €	197.172 €	192.945 €	189.059 €	185.469 €	182.138 €	179.035 €	176.134 €
13 -	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €	99.288 €
14 -	111.318 €	108.663 €	106.252 €	104.046 €	102.019 €	100.145 €	98.407 €	96.788 €	95.275 €
15 -	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €	35.197 €
16 -	32.137 €	31.474 €	30.871 €	30.320 €	29.813 €	29.344 €	28.910 €	28.505 €	28.127 €
17 -	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €	163.814 €
18 -	206.883 €	201.795 €	197.172 €	192.945 €	189.059 €	185.469 €	182.138 €	179.035 €	176.134 €

En la siguiente tabla se muestran los vehículos que se han de retirar de la flota cada año y los coches que se tienen que incorporar para sustituir a los que ya no están. En esta simulación, al haber reducido la tasa de reemplazo al 5%, se deberían de retirar únicamente 3 vehículos en cada año del estudio.

Sin embargo, en la siguiente tabla se muestra que se retirar 4 automóviles para cada año. Esto se debe a que con solo un 5% de tasa de reemplazo no se puede alcanzar la reducción de emisiones deseada. La herramienta intenta encontrar una solución que alcance los objetivos de reducción de emisiones marcados, en este caso el 50%. La solución con mayor reducción de emisiones será la que incorpore todos los vehículos de la tecnología eléctrica que no emite CO₂. Por tanto, al finalizar el estudio habrá 9x3=27 vehículos con 0 emisiones de los 60 automóviles que componen la flota, lo que supone el 45% del parque. Por ello, no es posible que haya una solución capaz de alcanzar el 50% de reducción de emisiones.

Ante esta situación, la herramienta aumenta la tasa de reemplazo hasta que sea capaz de encontrar una solución con ese porcentaje de reducción de emisiones. En este caso, reemplazando cada año 4 vehículos sí que ha encontrado una solución. La tasa de reemplazo de la solución final es del 6,66%.

Los vehículos que se retiran de la flota cada año son los mismos que los 27 primeros del caso base ya que no se ha modificado ningún valor actual y los coeficientes de reemplazo de los vehículos siguen siendo iguales.

Como se ha explicado, los NPV de los vehículos candidatos a incorporarse son los mismos que en el caso base. Por ello, la opción más económica sería la misma en ambos casos, incorporando a la flota los vehículos más económicos en cada caso. Sin embargo, en esta simulación, al tener un objetivo de reducción de emisiones exigente con la mitad de tasa de reemplazo, la solución elegirá incorporar vehículos de bajas emisiones aunque sean más caros que otros.

Por ejemplo, en el año 2024, la solución indica que hay que incorporar 2 vehículos medianos eléctricos. En el caso base, estos dos vehículos son diésel puesto que la paridad en esta categoría todavía no se ha alcanzado, siendo más económico incorporar un automóvil diésel que uno eléctrico. No obstante, en esta simulación, al necesitar una mayor reducción de emisiones que la solución con el NPV mínimo, es necesario incorporar vehículos de eléctricos aunque sean más caros.

Tabla 51: Simulación 6: Vehículos a retirar e incorporar en cada año del estudio

Año	Identificador	Tamaño	Ruta	Identificador Nuevo	Marca	Modelo	Tipo	NPV
2022	760	Pequeño	3	1	Renault	e-Jumpy	Eléctrico	- 32.137 €
	784	Pequeño	3	2	Renault	e-Jumpy	Eléctrico	- 32.137 €
	785	Pequeño	3	3	Renault	e-Jumpy	Eléctrico	- 32.137 €
	799	Grande	3	4	Volta	TGM	Diesel	- 163.814 €
2023	809	Mediano	1	5	Iveco	Daily	Diesel	- 99.288 €
	852	Grande	3	6	Volta	TGM	Diesel	- 163.814 €
	893	Pequeño	2	7	Seat	e-Jumpy	Eléctrico	- 31.474 €
	927	Pequeño	3	8	Renault	e-Jumpy	Eléctrico	- 31.474 €
2024	772	Pequeño	2	9	Seat	e-Jumpy	Eléctrico	- 30.871 €
	781	Pequeño	1	10	Citroen	e-Jumpy	Eléctrico	- 30.871 €
	811	Mediano	2	11	VW	E-Daily	Eléctrico	- 106.252 €
	882	Mediano	1	12	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 106.252 €
2025	793	Pequeño	1	13	Citroen	e-Jumpy	Eléctrico	- 30.320 €
	856	Mediano	1	14	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 104.046 €
	884	Mediano	3	15	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 104.046 €
	900	Mediano	3	16	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 104.046 €
2026	849	Grande	2	17	Tesla	TGM	Diesel	- 163.814 €
	964	Mediano	2	18	VW	E-Daily	Eléctrico	- 102.019 €
	1010	Mediano	2	19	VW	E-Daily	Eléctrico	- 102.019 €
	1011	Mediano	3	20	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 102.019 €
2027	822	Grande	1	21	MAN	TGM	Diesel	- 163.814 €
	929	Pequeño	2	22	Seat	e-Jumpy	Eléctrico	- 29.344 €
	1015	Mediano	3	23	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 100.145 €
	1017	Mediano	3	24	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 100.145 €
2028	1503	Mediano	1	25	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 98.407 €
	1518	Mediano	2	26	VW	E-Daily	Eléctrico	- 98.407 €
	1537	Mediano	2	27	VW	E-Daily	Eléctrico	- 98.407 €
	1539	Mediano	1	28	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 98.407 €
2029	775	Grande	3	29	Volta	TGM	Diesel	- 163.814 €
	1517	Mediano	1	30	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 96.788 €
	1523	Mediano	3	31	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 96.788 €
	1536	Mediano	3	32	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 96.788 €
2030	1019	Pequeño	1	33	Citroen	e-Jumpy	Eléctrico	- 28.127 €
	1613	Mediano	1	34	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 95.275 €
	1614	Mediano	3	35	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 95.275 €
	1623	Mediano	2	36	VW	E-Daily	Eléctrico	- 95.275 €

La siguiente tabla es un resumen anual del estudio económico del caso base. En ella se muestra lo que la empresa debe invertir en NPV cada año del estudio, así como la distribución del coste total en cada uno de los años. Cabe destacar que el NPV a gastar cada año varía entre un 8% y un 15% del total siendo el año con menor NPV es el 2022

con 260.226,72 € y el mayor es el 2026 con 468.168,05 €. La distribución del NPV en cada año del estudio es irregular lo que no favorece a la empresa. Lo ideal sería tener un gasto anual constante a lo largo del estudio que permitiera a la empresa gestionar mejor los recursos y tener un cash flow más constante.

La comparación del NPV con el caso base se hace complicado debido a la incorporación de un número distinto de vehículos. Proporcionalmente, el NPV de cada año en esta simulación es mayor que la del caso base, puesto que hay que introducir más vehículos eléctricos haciendo que el NPV aumente.

Tabla 52: Simulación 6: Resumen de los resultados del estudio económico

Año	NPV Año	NPV Acumulado	% NPV	% NPV Acumulado
2022	- 260.227 €	- 260.227 €	8%	8%
2023	- 326.050 €	- 586.277 €	10%	18%
2024	- 271.351 €	- 857.628 €	8%	27%
2025	- 339.492 €	- 1.197.120 €	11%	37%
2026	- 468.168 €	- 1.665.288 €	15%	52%
2027	- 393.093 €	- 2.058.381 €	12%	64%
2028	- 393.629 €	- 2.452.011 €	12%	76%
2029	- 454.180 €	- 2.906.190 €	14%	90%
2030	- 313.952 €	- 3.220.142 €	10%	100%

El NPV total del estudio son - 3.220.142,33 € que, sin ser la solución más económica para la empresa, logra obtener la reducción de emisiones de CO₂ requerida por la empresa y la Unión Europea con una tasa de reemplazo menor que el caso base. La diferencia económica es de 1.605.252,10 € más barata respecto al caso base puesto que solo se tienen que incorporar 4 vehículos en lugar de los 6 de la primera simulación.

3.9.3 Estudio Medioambiental

Tras haber analizado los resultados económicos de la simulación, se hará lo mismo con los resultados medioambientales. Para ello se mostrarán distintas gráficas y tablas que representan el proceso de optimización y los resultados finales de emisiones de CO₂ y porcentaje de reducción de emisiones a lo largo del estudio.

En primer lugar, se muestran dos gráficas donde en el eje Y se muestra el % de reducción de emisiones total del estudio y en el eje X el NPV total del estudio. La diferencia entre la gráfica situada a la izquierda y la situada a la derecha es la siguiente. La gráfica de la izquierda representa el NPV dual de la solución, es decir, incluyendo el precio sombra (λ) dado a las emisiones de cada vehículo, mientras que la gráfica de la derecha muestra el NPV real de la simulación.

Como se ha explicado en la metodología, se hace uso del precio sombra para las emisiones de CO₂ para poder incluir las restricciones de emisiones en la función objetivo del coste total del estudio. Es por ello por lo que, todos los puntos representados en la misma línea horizontal corresponden a la misma combinación de vehículos, pero tienen distintos NPV debido a que λ varía su valor en cada iteración. Sin embargo, en la gráfica de la derecha

los puntos se superponen ya que, al no tener en cuenta el precio sombra, tienen el mismo NPV total.

La primera iteración del proceso se realiza con λ igual a 0, por lo que no se tienen en cuenta las emisiones de los vehículos. Esta solución será la que tenga el menor NPV del estudio y, en esta simulación, alcanza solamente el 35% de emisiones.

La segunda iteración de la optimización se realiza con λ igual a 1.000.000, lo que significa que los vehículos elegidos serán seleccionados únicamente por sus emisiones, al haber dado un valor realmente grande al precio sombra. Por tanto, esta solución incorporará todos vehículos eléctricos siendo la solución con la mayor reducción de emisiones, alcanzando la cifra de 63%. Esta reducción máxima de emisiones es menor a la de otras simulaciones debido a que solo se están sustituyendo 4 vehículos al año, lo que limita la reducción de emisiones al incorporar 27 vehículos solo a lo largo del estudio.

A través de iteraciones, la solución óptima tiene una reducción total de 51,73%, superando los 50% que se han marcado como objetivo. Cabe destacar que el color de los gráficos es distinto, señal de que la tasa de reemplazo ha tenido que ser aumentada para lograr estas soluciones.

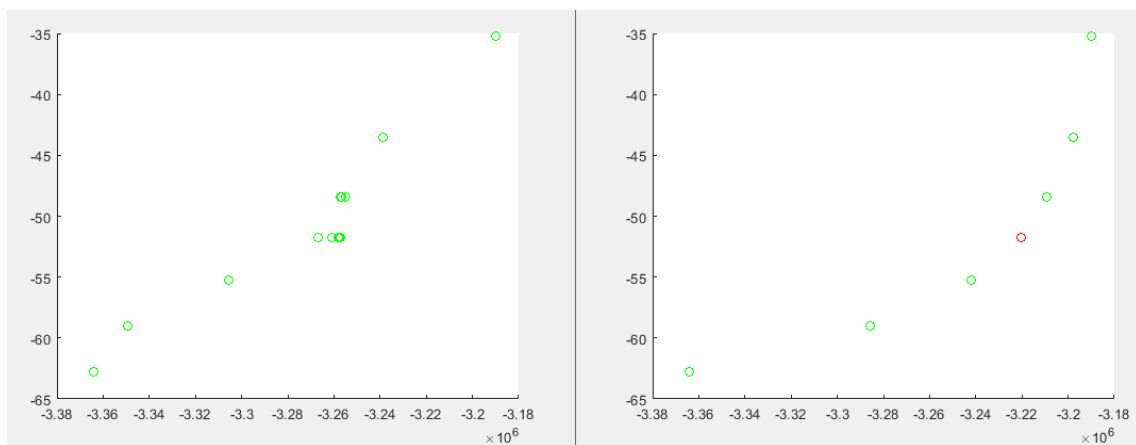


Figura 23: Simulación 6: Gráfico de dispersión de las distintas soluciones

La siguiente tabla muestra un resumen de las emisiones de todos los vehículos que componen la flota cada año. Se observa como poco a poco las emisiones, medidas en toneladas de CO₂, van disminuyendo a lo largo de los años del estudio. En esta simulación las emisiones tienen un ritmo de disminución constante año tras año, lo que permite cumplir objetivos de reducción de emisiones intermedio durante el estudio.

Tabla 53: Simulación 6: Resumen de los resultados del estudio medioambiental

Año	Emisiones Año	% Reducción Emisiones
2021	886278	0,00%
2022	837609	5,49%
2023	800270	9,70%
2024	732976	17,30%
2025	671479	24,24%
2026	632188	28,67%
2027	586854	33,78%
2028	532063	39,97%
2029	486153	45,15%
2030	427763	51,73%

La simulación del caso base de Loomis termina con una reducción total de emisiones en 9 años de estudio del -51,73% superando la reducción requerida en los parámetros del estudio (50%) con tan solo un 6,66% de tasa de reemplazo.

3.10 Simulación 7: El gobierno retira los subsidios

Esta simulación pretende recrear un escenario posible en un futuro. En este caso, se eliminarán los subsidios dados por el gobierno a las tecnologías más limpias. Esta situación puede suceder en cualquier momento, cuando los gobernantes consideren que ya no es necesaria esta subvención ya sea porque ya está desarrollada la tecnología o porque se ha decidido apoyar otra tecnología como puede ser los automóviles de hidrógeno.

3.10.1 Parámetros

Los parámetros del estudio se mantienen iguales que los del caso base. Solamente se ha de eliminar la columna de subsidios en la columna de los datos de los vehículos del mercado.

Tabla 54: Simulación 7: Parámetros

Parámetros	
Coficiente para Km	0,5
Coficiente para Edad	0,5
Tasa Reemplazo Compra	10,00%
Años Estimación	9
Año Actual	2021
Amortización	7
Precio Electricidad (€/kWh)	0,12
Precio Diésel (€/litro)	0,85

Emisiones CO2 (kg/litro)	2,65
Precio Emisiones (€/ton CO2)	82
Cambio en el IPC	1,4%
Impuestos	21%
Tasa de Retorno	7%
Objetivo Reducción Emisiones CO2	50%
Modo de simulación	Reducción necesariamente mayor al objetivo

3.10.2 Estudio Económico

Una vez terminada la simulación, se procede al análisis de los resultados económicos. En primer lugar, la siguiente tabla muestra el NPV de cada uno de los vehículos disponibles en el mercado. Este resultado varía según el año de compra de un determinado vehículo. Esto se debe a la reducción del precio de los vehículos eléctricos, pero en esta simulación, no hay subsidios o ayudas por parte del estado que lo abaraten más. Para los vehículos diésel, el NPV se mantiene, ya que no se contempla una gran variación en los precios y costes a lo largo del estudio.

Como se ha explicado en la metodología, las ayudas por parte del gobierno van disminuyendo a medida que se reduce la diferencia entre los NPV de los vehículos diésel y eléctrico para cada categoría. Siempre manteniendo el porcentaje de subsidio que reciben el primer año en comparación con la diferencia entre los NPV de los vehículos diésel y eléctrico para el primer año.

En el caso base los vehículos grandes tendrán subsidio durante todos los años puesto que no logran alcanzar la paridad. Para los vehículos medianos, la paridad se alcanza entre los años 2027 y 2028, año en el que se suprimirían las ayudas por parte del estado. Por último, para los vehículos pequeños, la paridad se alcanza al inicio del estudio por lo que nunca reciben ayudas. La siguiente tabla muestra los subsidios para los vehículos del mercado:

Tabla 55: Simulación 7: Subsidios anuales para cada vehículo del mercado

Año Estudio / Vehículo Mercado	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
1									
2	2.500,00 €	1.948,07 €	1.447,18 €	988,26 €	566,96 €	177,46 €			
3									
4	2.000,00 €								
5									
6	2.800,00 €	2.469,07 €	2.168,74 €	1.893,58 €	1.640,97 €	1.407,44 €	1.190,89 €	989,42 €	801,26 €
7									
8	2.500,00 €	1.948,07 €	1.447,18 €	988,26 €	566,96 €	177,46 €			
9									
10	2.000,00 €								
11									
12	2.800,00 €	2.469,07 €	2.168,74 €	1.893,58 €	1.640,97 €	1.407,44 €	1.190,89 €	989,42 €	801,26 €
13									
14	2.500,00 €	1.948,07 €	1.447,18 €	988,26 €	566,96 €	177,46 €			
15									
16	2.000,00 €								
17									
18	2.800,00 €	2.469,07 €	2.168,74 €	1.893,58 €	1.640,97 €	1.407,44 €	1.190,89 €	989,42 €	801,26 €

Comparando la tabla siguiente con la del caso base, se corrobora que los NPV de los vehículos diésel son iguales entre sí. No obstante, para los vehículos eléctricos no siempre son iguales. Esto se debe a la ausencia de subsidio o ayudas por parte del estado.

Por tanto, la diferencia entre los NPV de las dos simulaciones será la tabla anterior, teniendo en cuenta que el NPV con mayor valor absoluto será el de esta simulación, al estar rebajado por los subsidios.

Tabla 56: Simulación 7: NPV de los vehículos del mercado

Año Estudio	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
1	- 99.288 €	- 99.288 €	- 99.288 €	- 99.288 €	- 99.288 €	- 99.288 €	- 99.288 €	- 99.288 €	- 99.288 €
2	- 111.318 €	- 108.662 €	- 106.252 €	- 104.044 €	- 102.016 €	- 100.142 €	- 98.404 €	- 96.788 €	- 95.278 €
3	- 35.197 €	- 35.197 €	- 35.197 €	- 35.197 €	- 35.197 €	- 35.197 €	- 35.197 €	- 35.197 €	- 35.197 €
4	- 32.137 €	- 31.474 €	- 30.871 €	- 30.319 €	- 29.812 €	- 29.344 €	- 28.909 €	- 28.505 €	- 28.127 €
5	- 163.814 €	- 163.814 €	- 163.814 €	- 163.814 €	- 163.814 €	- 163.814 €	- 163.814 €	- 163.814 €	- 163.814 €
6	- 206.883 €	- 201.792 €	- 197.173 €	- 192.941 €	- 189.055 €	- 185.463 €	- 182.132 €	- 179.033 €	- 176.139 €
7	- 99.288 €	- 99.288 €	- 99.288 €	- 99.288 €	- 99.288 €	- 99.288 €	- 99.288 €	- 99.288 €	- 99.288 €
8	- 111.318 €	- 108.662 €	- 106.252 €	- 104.044 €	- 102.016 €	- 100.142 €	- 98.404 €	- 96.788 €	- 95.278 €
9	- 35.197 €	- 35.197 €	- 35.197 €	- 35.197 €	- 35.197 €	- 35.197 €	- 35.197 €	- 35.197 €	- 35.197 €
10	- 32.137 €	- 31.474 €	- 30.871 €	- 30.319 €	- 29.812 €	- 29.344 €	- 28.909 €	- 28.505 €	- 28.127 €
11	- 163.814 €	- 163.814 €	- 163.814 €	- 163.814 €	- 163.814 €	- 163.814 €	- 163.814 €	- 163.814 €	- 163.814 €
12	- 206.883 €	- 201.792 €	- 197.173 €	- 192.941 €	- 189.055 €	- 185.463 €	- 182.132 €	- 179.033 €	- 176.139 €
13	- 99.288 €	- 99.288 €	- 99.288 €	- 99.288 €	- 99.288 €	- 99.288 €	- 99.288 €	- 99.288 €	- 99.288 €
14	- 111.318 €	- 108.662 €	- 106.252 €	- 104.044 €	- 102.016 €	- 100.142 €	- 98.404 €	- 96.788 €	- 95.278 €
15	- 35.197 €	- 35.197 €	- 35.197 €	- 35.197 €	- 35.197 €	- 35.197 €	- 35.197 €	- 35.197 €	- 35.197 €
16	- 32.137 €	- 31.474 €	- 30.871 €	- 30.319 €	- 29.812 €	- 29.344 €	- 28.909 €	- 28.505 €	- 28.127 €
17	- 163.814 €	- 163.814 €	- 163.814 €	- 163.814 €	- 163.814 €	- 163.814 €	- 163.814 €	- 163.814 €	- 163.814 €
18	- 206.883 €	- 201.792 €	- 197.173 €	- 192.941 €	- 189.055 €	- 185.463 €	- 182.132 €	- 179.033 €	- 176.139 €

Los vehículos a retirar de la flota cada año son los mismos que en el caso base, ya que los datos de la flota actual introducidos por el usuario no han variado de un caso a otro. Aunque los vehículos a retirar sean los mismos, los vehículos a incorporar en cada año del estudio pueden variar, ya que se debe de obtener la combinación de vehículos más barata para poder cumplir con el objetivo de reducción de emisiones impuesto en los parámetros del estudio y, al haber eliminado los subsidios, los NPV de los vehículos eléctricos aumentan, obteniendo una solución más cara.

En la siguiente tabla se pueden observar los vehículos que se han de incorporar a la flota para cada año del estudio. Estos automóviles son los mismos que se incorporan en el caso base, obteniéndose la misma reducción de emisiones, pero no el mismo NPV. El cost of ownership total es mayor en esta simulación puesto que algunos de los vehículos eléctricos incorporados ahora tienen un NPV mayor al no recibir ayudas por parte del estado.

Tabla 57: Simulación 7: Vehículos a retirar e incorporar en cada año del estudio

Año	Identificador	Tamaño	Ruta	Identificador Nuevo	Marca	Modelo	Tipo	NPV
2022	760	Pequeño	3	1	Renault	e-Jumpy	Eléctrico	- 32.137 €
	784	Pequeño	3	2	Renault	e-Jumpy	Eléctrico	- 32.137 €
	785	Pequeño	3	3	Renault	e-Jumpy	Eléctrico	- 32.137 €
	799	Grande	3	4	Volta	TGM	Diesel	- 163.814 €
	852	Grande	3	5	Volta	TGM	Diesel	- 163.814 €
	927	Pequeño	3	6	Renault	e-Jumpy	Eléctrico	- 32.137 €
2023	772	Pequeño	2	7	Seat	e-Jumpy	Eléctrico	- 31.474 €
	781	Pequeño	1	8	Citroen	e-Jumpy	Eléctrico	- 31.474 €
	809	Mediano	1	9	Iveco	Daily	Diesel	- 99.288 €
	811	Mediano	2	10	VW	Daily	Diesel	- 99.288 €
	882	Mediano	1	11	Iveco	Daily	Diesel	- 99.288 €
	893	Pequeño	2	12	Seat	e-Jumpy	Eléctrico	- 31.474 €
2024	793	Pequeño	1	13	Citroen	e-Jumpy	Eléctrico	- 30.871 €
	849	Grande	2	14	Tesla	TGM	Diesel	- 163.814 €
	856	Mediano	1	15	Iveco	Daily	Diesel	- 99.288 €
	884	Mediano	3	16	Nissan	Daily	Diesel	- 99.288 €
	900	Mediano	3	17	Nissan	Daily	Diesel	- 99.288 €
	964	Mediano	2	18	VW	Daily	Diesel	- 99.288 €
2025	822	Grande	1	19	MAN	TGM	Diesel	- 163.814 €
	929	Pequeño	2	20	Seat	e-Jumpy	Eléctrico	- 30.319 €
	1010	Mediano	2	21	VW	Daily	Diesel	- 99.288 €
	1011	Mediano	3	22	Nissan	Daily	Diesel	- 99.288 €
	1015	Mediano	3	23	Nissan	Daily	Diesel	- 99.288 €
	1017	Mediano	3	24	Nissan	Daily	Diesel	- 99.288 €
2026	1503	Mediano	1	25	Iveco	Daily	Diesel	- 99.288 €
	1518	Mediano	2	26	VW	Daily	Diesel	- 99.288 €
	1523	Mediano	3	27	Nissan	Daily	Diesel	- 99.288 €
	1536	Mediano	3	28	Nissan	Daily	Diesel	- 99.288 €
	1537	Mediano	2	29	VW	Daily	Diesel	- 99.288 €
	1539	Mediano	1	30	Iveco	Daily	Diesel	- 99.288 €
2027	775	Grande	3	31	Volta	TGM	Diesel	- 163.814 €
	1019	Pequeño	1	32	Citroen	e-Jumpy	Eléctrico	- 29.344 €
	1517	Mediano	1	33	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 100.142 €
	1613	Mediano	1	34	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 100.142 €
	1614	Mediano	3	35	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 100.142 €
	1623	Mediano	2	36	VW	E-Daily	Eléctrico	- 100.142 €
2028	1703	Mediano	1	37	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 98.404 €
	1709	Mediano	3	38	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 98.404 €
	1717	Mediano	2	39	VW	E-Daily	Eléctrico	- 98.404 €
	1721	Mediano	1	40	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 98.404 €
	1724	Mediano	2	41	VW	E-Daily	Eléctrico	- 98.404 €
	1734	Pequeño	3	42	Renault	e-Jumpy	Eléctrico	- 28.909 €
2029	1533	Mediano	1	43	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 96.788 €
	1635	Mediano	1	44	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 96.788 €
	1733	Pequeño	2	45	Seat	e-Jumpy	Eléctrico	- 28.505 €
	1805	Mediano	3	46	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 96.788 €
	1815	Mediano	3	47	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 96.788 €
	1816	Mediano	3	48	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 96.788 €
2030	1731	Mediano	2	49	VW	E-Daily	Eléctrico	- 95.278 €
	1809	Mediano	3	50	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 95.278 €
	1810	Mediano	1	51	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 95.278 €
	1817	Mediano	3	52	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 95.278 €
	1932	Mediano	3	53	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 95.278 €
	1950	Mediano	3	54	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 95.278 €

La siguiente tabla es un resumen anual del estudio económico del caso base. En ella se muestra lo que la empresa debe invertir en NPV cada año del estudio, así como la distribución del coste total en cada uno de los años. Cabe destacar que el NPV a gastar cada año varía entre un 8% y un 12% del total. Esto es muy bueno para la empresa ya que tendrá una partida de presupuestos relativamente constante a lo largo de los 9 años del

estudio, variando entre los 392.285,75 € en 2023 y los 595.730,38 € en 2026. La empresa podrá cumplir con la reducción de emisiones deseada teniendo un plan constante de recambio de la flota y sin tener sobresaltos de gasto entre un año y otro, haciendo que se descontrola el cash flow disponible de la compañía.

Comparando la tabla resumen con la del caso base se observa que casi todos los años se obtiene el mismo NPV. Esto ocurre porque solo varía el NPV del año si se incorpora un vehículo eléctrico de una categoría que, en el caso base, seguiría recibiendo subsidio en ese año. Por tanto, solo habría diferencia en vehículos medianos hasta 2028 y vehículos grandes durante todo el estudio. Los resultados indican que no se incorpora ningún vehículo grande eléctrico y solo se incorporan vehículos medianos eléctricos desde 2027, por lo que habría diferencia solo en el 2027.

Efectivamente, el único año que tiene un NPV diferente al caso base es el 2027 por la razón explicada anteriormente. Ese año, en este estudio se ha de gastar 700,82 € por la falta de subsidios. Estos provienen de la falta de ayudas para los 4 automóviles medianos eléctricos que se incorporan a la flota, los cuales tienen en el caso base un subsidio de 177,46 € cada uno.

Tabla 58: Simulación 7: Resumen de los resultados del estudio económico

Año	NPV Año	NPV Acumulado	% NPV	% NPV Acumulado
2022	- 456.179 €	- 456.179 €	9%	9%
2023	- 392.286 €	- 848.464 €	8%	18%
2024	- 591.839 €	- 1.440.303 €	12%	30%
2025	- 591.287 €	- 2.031.590 €	12%	42%
2026	- 595.730 €	- 2.627.320 €	12%	54%
2027	- 593.727 €	- 3.221.048 €	12%	67%
2028	- 520.932 €	- 3.741.979 €	11%	78%
2029	- 512.443 €	- 4.254.422 €	11%	88%
2030	- 571.666 €	- 4.826.088 €	12%	100%

El NPV total del estudio son - 4.826.088,15 € que, sin ser la solución más económica para la empresa, logra obtener la reducción de emisiones de CO₂ requerida por la empresa y la Unión Europea con un gasto adicional no relevante respecto al caso base. En total, la falta de ayudas por parte del gobierno hace que la empresa tenga que gastar 700 € más para poder incorporar la misma combinación de vehículos a la flota.

3.10.3 Estudio Medioambiental

Tras haber analizado los resultados económicos de la simulación, se hará lo mismo con los resultados medioambientales. Para ello se mostrarán distintas gráficas y tablas que representan el proceso de optimización y los resultados finales de emisiones de CO₂ y porcentaje de reducción de emisiones a lo largo del estudio.

En primer lugar, se muestran dos gráficas donde en el eje Y se muestra el % de reducción de emisiones total del estudio y en el eje X el NPV total del estudio. La diferencia entre la gráfica situada a la izquierda y la situada a la derecha es la siguiente. La gráfica de la izquierda representa el NPV dual de la solución, es decir, incluyendo el precio sombra (λ)

dado a las emisiones de cada vehículo, mientras que la gráfica de la derecha muestra el NPV real de la simulación.

Como se ha explicado en la metodología, se hace uso del precio sombra para las emisiones de CO₂ para poder incluir las restricciones de emisiones en la función objetivo del coste total del estudio. Es por ello por lo que, todos los puntos representados en la misma línea horizontal corresponden a la misma combinación de vehículos, pero tienen distintos NPV debido a que λ varía su valor en cada iteración. Sin embargo, en la gráfica de la derecha los puntos se superponen ya que, al no tener en cuenta el precio sombra, tienen el mismo NPV total.

A través de iteraciones, la solución óptima tiene una reducción total de 54,12%. Esta reducción es la misma que el caso base ya que, como se ha podido comprobar, los vehículos a incorporar a lo largo del estudio son los mismos en ambos casos. Sin embargo, el NPV total de la solución no es la misma, siendo en esta simulación ligeramente mayor como se ha explicado en el análisis de los resultados económicos.

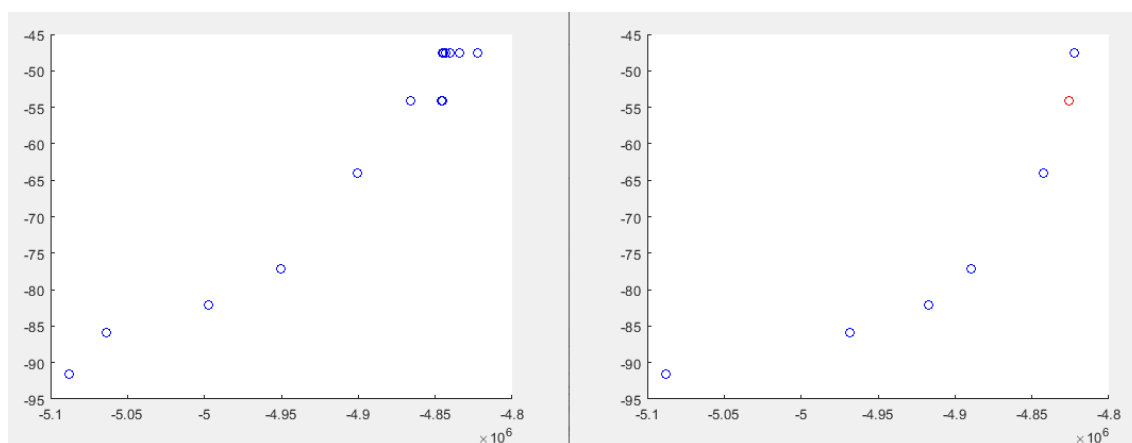


Figura 24: Simulación 7: Gráfico de dispersión de las distintas soluciones

La siguiente tabla muestra un resumen de las emisiones de todos los vehículos que componen la flota cada año. Se observa como poco a poco las emisiones, medidas en toneladas de CO₂, van disminuyendo a lo largo de los años del estudio. Sin embargo, cabe destacar que, en el 2026, al haber introducido todos los vehículos de tipo diésel, no ha habido reducción de emisiones durante ese año.

A medida que pasan los años del estudio, se incorporan más vehículos eléctricos y, por tanto, la reducción de emisiones es mayor. Esto se observa claramente ya que la reducción de emisiones en los 7 primeros años es del 25,34% mientras en los 3 siguientes es del 28,78%.

Los resultados de la tabla resumen son los mismos que en el caso base puesto que el mix de vehículos que se ha de incorporar es igual en ambos casos. Por tanto, en esta simulación no varía la reducción de emisiones conseguida si no solamente el NPV total del estudio ya que se ha variado un parámetro puramente económico.

Tabla 59: Simulación 7: Resumen de los resultados del estudio medioambiental

Año	Emisiones Año	% Reducción Emisiones
2021	886278	0,00%
2022	816355	7,89%
2023	762218	14,00%
2024	747734	15,63%
2025	733065	17,29%
2026	737300	16,81%
2027	661702	25,34%
2028	569298	35,77%
2029	493400	44,33%
2030	406662	54,12%

La simulación del caso base de Loomis termina con una reducción total de emisiones en 9 años de estudio del -54,12% superando en más de 4 puntos la reducción requerida en los parámetros del estudio (50%).

3.11 Conclusiones

En este apartado se han realizado hasta 7 simulaciones para entender cómo debería de ser reemplazada la flota de vehículos de Loomis. La flota elegida pertenece a la base de Madrid y consta de 60 vehículos con diferentes configuraciones de tamaño y tipo de ruta asignado.

El caso base tiene una tasa de reemplazo del 10% y un objetivo de reducción de emisiones del 50% a conseguir en 9 años de estudio. Por tanto, durante la simulación se tendrán que retirar e incorporar 6 vehículos al año, es decir, un total de 54 automóviles a lo largo del estudio. Los detalles de los resultados se pueden observar dentro del apartado donde se analizan detalladamente. La solución óptima del estudio cuenta con un 54,12% de reducción de emisiones en 9 años donde la empresa tiene que gastar un NPV total de 4.825.394,43 €.

El resto de las simulaciones del capítulo pretenden recrear distintos escenarios que pueden ocurrir en un futuro próximo. En cada una de ellas se varía un parámetro para analizar cómo afecta en la simulación y en la solución óptima del estudio. Las simulaciones realizadas han sido las siguientes:

2. Disminución de la reducción de emisiones del 50% al 30%: en este escenario la empresa tiene que alcanzar una reducción menor de emisiones en el mismo tiempo, por lo que necesitará emplear menos dinero para conseguir el objetivo. La solución óptima tiene un NPV total de 4.822.678,74 € obteniendo un 47,52% de reducción de emisiones.
3. Subida del precio del diésel un 40%: al haber aumentado el precio del combustible, se incorporarán más vehículos eléctricos que son más caros que los automóviles diésel, pero producen menos emisiones de CO₂. Por tanto, la solución

- obtenida tiene un NPV total mayor que el caso base (4.963.819,26 €) con una reducción muy alta de emisiones del 77,21%.
4. La duración del estudio se reduce de 9 años a 6 años: al reducirse el tiempo disponible para reducir el 50% de las emisiones, la empresa deberá gastar más dinero proporcionalmente en los 6 años, aunque el NPV total sea menor al reemplazar solo $6 \times 6 = 36$ vehículos. La solución óptima tiene una reducción total de emisiones del 53,38% y un NPV total de 3.292.747,76 €.
 5. Subida del precio de la electricidad un 67%: al aumentar el precio de la electricidad, habrá que emplear más dinero en los vehículos eléctricos que se incorporen. Por ello, la solución óptima tiene la misma combinación de vehículos nuevos obteniendo la misma reducción de emisiones (54,12%) pero con un NPV total de 4.947.704,88 €, mayor que el caso base.
 6. Reducción de la tasa de reemplazo del 5% al 10%: en este escenario la empresa solo retira 3 vehículos de la flota cada año, por lo que solo recambia 27 vehículos a lo largo del estudio, siendo imposible llegar a un 50% de reducción de emisiones. Por ello, la herramienta aumenta la tasa de reemplazo al 6,66% (4 vehículos) para obtener una solución que cumpla con los objetivos de emisiones. El NPV total es de 3.220.142,33 € y una reducción total de emisiones del 51,73%.
 7. Retiro de los subsidios por parte del estado: al retirar los subsidios, el NPV de los vehículos eléctricos aumentarán, haciendo que el NPV total de la simulación aumente. La solución óptima tiene la misma combinación de vehículos incorporados a la flota por lo que tiene la misma reducción de emisiones que el caso base (54,12%) pero un NPV ligeramente mayor de 4.826.088,15 €.

Tabla 60: Resumen de los resultados de las simulaciones

Nº Simulación	Estudio	Reducción de Emisiones	NPV Total
1	Caso Base	54,12%	4.825.394,43 €
2	Reducción de Emisiones al 30%	47,52%	4.822.678,74 €
3	Subida de precio del diesel del 40%	77,21%	4.963.819,26 €
4	Duración del estudio reducida a 6 años	53,38%	3.292.747,76 €
5	Subida de precio de la electricidad del 67%	54,12%	4.947.704,88 €
6	Reducción de la tasa de reemplazo al 5%	51,73%	3.220.142,33 €
7	Retiro de los subsidios	54,12%	4.826.088,15 €

4 Replicabilidad y Escalabilidad a otros sectores y entornos

4.1 Introducción

La contaminación medioambiental no es problema de una sola empresa o país. La preocupación es global y afecta a todos. Por ello, uno de los objetivos del proyecto es que la herramienta pueda ser utilizada por cualquier empresa, sector o entorno. Debido a la generalidad de la metodología desarrollada, la herramienta puede ser usada por cualquier empresa que tenga una flota de vehículos que renovar y mantener.

Este capítulo muestra lo importante y complejo que es tener en cuenta estos factores en el diseño de la herramienta, siendo un factor crítico en ella. Además, se simularán varios ejemplos con el fin de esclarecer el potencial y la adaptación de la herramienta a todo tipo de flotas.

4.2 Replicabilidad

La palabra replicabilidad se define como la capacidad de repetir un experimento en diferentes situaciones, con diferentes sujetos e investigadores. Esta característica tiene como fin el confirmar que la seguridad de los resultados del primer experimento y verificar la viabilidad de su uso en otros entornos y condiciones. La replicabilidad de un ensayo o herramienta es esencial si pretende ser utilizada en distintos sectores y en distintos países y es una propiedad básica de los métodos científicos. Esta característica dota al estudio de un ámbito universal para atajar problemas u oportunidades en condiciones distintas al ambiente en el que se generó el primer experimento.

En este proyecto la replicabilidad es un factor fundamental y por ello uno de los objetivos que se propuso desde el primer momento. La razón de este trabajo es ayudar a las empresas a realizar un proceso de electrificación de su flota óptimo, minimizando su gasto en él y cumpliendo el objetivo de reducción de emisiones. Por consiguiente, es una solución que abarca a cualquier tipo de empresa que maneje una flota de vehículos. Por otro lado, la motivación del proyecto es la sostenibilidad para intentar frenar el cambio climático, problema generado por la acción humana y que afecta a toda la población, no solo a distintas zonas o sectores. Definido el ámbito que abarca el proyecto, se entiende que la herramienta debe de ser utilizada por cualquier empresa y en cualquier parte del mundo, lo que crea la necesidad de ser replicable.

Como muestra de la gran replicabilidad del proyecto, se realizará una simulación de una flota totalmente diferente a la de Loomis. Con ello se pretende mostrar que la herramienta puede ser utilizada por empresas ubicadas en otro sector, con un tipo de flota distinta y en un país diferente. La empresa de la simulación será una compañía dedicada al reparto de comida a domicilio localizado en la ciudad brasileña de Río de Janeiro. A continuación se explicarán las características de la empresa, la flota y su entorno.

La metodología desarrollada en este proyecto tiene en consideración la replicabilidad de ella. Esto se observa en la información que debe introducir el usuario para utilizar la herramienta. Estos datos que se tienen que escribir en un Excel se pueden dividir en 4 categorías: datos de la flota actual, datos de los vehículos del mercado, parámetros del estudio e informes generados en la simulación.

En primer lugar, el usuario puede elegir como quiere clasificar los vehículos que se utilizan en su empresa. Por un lado, se definen los tamaños de los automóviles, pudiendo dividirlos en los tamaños que se desee y dándole los nombres que se quieran. Por otro lado, el usuario define cuántos tipos de ruta habrá en su empresa y las características de cada una de ellas. Esta elección le da a la empresa la capacidad de elegir como quiere dividir y gestionar su flota en la simulación. Por ejemplo, el usuario puede definir los siguientes tamaños y rutas:

Tamaños:

- Motocicleta: para los vehículos de dos ruedas a motor
- Turismo: para los automóviles

Rutas:

- Ruta 1: ruta que recorre el norte de Rio de Janeiro
- Ruta 2: ruta que recorre el este de Rio de Janeiro
- Ruta 3: ruta que recorre el oeste Rio de Janeiro
- Ruta 4: ruta que recorre el sur de Rio de Janeiro
- Ruta 5: ruta que recorre el centro de Rio de Janeiro

Otros parámetros que el usuario debe definir son los indicadores de la flota actual y de los vehículos que se incorporan. Esto dará libertad a la empresa de denominar a los medios de transporte como quiera tanto antes como después del estudio. Esta empresa tiene 30 vehículos que denomina del 1 al 30, por lo que los identificadores nuevos irán a partir del 30.

Por otro lado, la tasa de reemplazo también es configurable por el usuario. Hay empresas que cambian los vehículos a los pocos años para evitar averías y dar una buena imagen de empresa y otras que no pueden invertir tanto dinero en ellos. Como la empresa del estudio no es muy grande y no tiene grandes ganancias solo se reemplaza un 7% de los vehículos cada año.

Para escoger los vehículos a retirar de la flota actual se tienen en cuenta dos factores clave en esta toma de decisiones: la edad y los kilómetros acumulados del vehículo. Según la empresa, puede dar más importancia a uno de los factores por encima del otro ya sea para que los vehículos tengan una buena imagen o porque lo que le importa son la distancia total de los vehículos. En este ejemplo se ha decidido dar más importancia a los kilómetros que a la edad ya que a la empresa no le importa que los vehículos que tiene sean antiguos. Por tanto, el peso de los kilómetros será un 70% y el de la edad un 30%.

La duración del estudio y el objetivo de reducción de emisiones también son parámetros que se han de definir. Esto ayuda a que la herramienta pueda ser utilizada en distintos países puesto que hay gobiernos que exigen una reducción mayor que otros o a cumplirlo

en un año específico que puede ser distinto según el lugar donde se encuentre la empresa. El estudio se hará a 12 años ya que, el ayuntamiento de Rio de Janeiro ha decretado una reducción de emisiones a las empresas para el año 2033. Esta reducción de emisiones que la empresa debe lograr es un 30% ya que el gobierno cree que los niveles de contaminación de la ciudad disminuirían hasta alcanzar los niveles aceptables marcado por la Organización Mundial de la Salud.

Los precios del combustible y electricidad también son parámetros del estudio puesto que no solo cada país tiene los suyos si no que para cada empresa pueden ser distintos. En este caso, el precio de la electricidad para esta empresa es de 0,15€/kWh y el diésel a 0,7€/litro siendo la electricidad más cara que en España y el diésel más barato. Además, los vehículos que utilizan producen una media de 3,2 kg CO₂/litro puesto que el diésel que compran es de mala calidad.

Por último, los parámetros económicos también son configurables y dependen en gran medida del país donde opera la empresa. Estos parámetros son el cambio en el IPC, los impuestos que paga la empresa y la tasa de retorno. En el caso de esta simulación, la inflación en Brasil es del 4%, los impuestos que pagan son el 10% y la tasa de retorno que quiere la empresa es un 3%.

Para que la herramienta se pueda utilizar en más países y en cualquier tipo de empresa sin importar su tamaño o sector, se ha desarrollado un programa ejecutable que puede ser utilizado en ordenadores que no tengan la licencia de Matlab instalada en este dispositivo. Muchas empresas no tienen este programa informático debido a que no lo necesitan o es demasiado caro, por ello el programa ejecutable les permite utilizar la herramienta sin tener que destinar más dinero para utilizarla. Por otro lado, el usuario no tendrá que lidiar con el código de la herramienta ni con Matlab, facilitando su uso para que pueda ser utilizado por cualquier persona dentro de la empresa, sin necesidad de saber utilizar Matlab.

Los datos de la flota actual también son flexibles para adaptarse a las circunstancias de cada caso. Por otro lado, los datos de los vehículos del mercado son introducidos por el usuario ya que estos dependen de los automóviles que quiera considerar la empresa y la información económica que tenga la empresa y haya acordado con proveedores.

4.2.1 Simulación de replicabilidad

4.2.1.1 Parámetros

La siguiente tabla muestra el resumen de los parámetros de esta simulación:

Tabla 61: Simulación Replicabilidad: Parámetros

Parámetros	
Coficiente para Km	0,7
Coficiente para Edad	0,3
Tasa Reemplazo Compra	7,00%
Años Estimación	12
Año Actual	2021
Amortización	7

Replicabilidad y Escalabilidad a otros sectores y entornos

Precio Electricidad (€/kWh)	0,15
Precio Diésel (€/litro)	0,7
Emisiones CO2 (kg/litro)	3,2
Precio Emisiones (€/ton CO2)	0
Cambio en el IPC	4,0%
Impuestos	10%
Tasa de Retorno	3%
Objetivo Reducción Emisiones CO2	30%
Modo de simulación	Reducción necesariamente mayor al objetivo

A continuación, se muestran los datos de la flota actual de la empresa. Cada ruta tiene 3 motocicletas y 3 turismos que abarcan las distintas zonas de la ciudad. Hay zonas que se necesitan hacer más kilómetros como la 2 ya que las entregas están muy separadas entre sí. Sin embargo, la ruta 5 que reparte en el centro hace menos kilómetros y la mitad de ellos en motocicleta por moverse en un entorno de densidad de población mayor y los pedidos más cercanos. Debido al tráfico de la zona central, los vehículos consumen más en esta ruta.

Tabla 62: Simulación Replicabilidad: Datos de la flota actual

Identificador	Tamaño	Tipo Ruta	Año Matriculación	Kilómetros Totales	Kilómetros 2020	Diesel 2020	Consumo 2020	Alquiler o Compra
1	Motocicleta	1	2008	63.000	4.700	700	14,89	Compra
2	Motocicleta	1	2010	56.000	5.200	730	14,04	Compra
3	Motocicleta	1	2012	46.000	5.300	740	13,96	Compra
4	Turismo	1	2007	150.000	9.100	1.100	12,09	Compra
5	Turismo	1	2010	110.000	9.400	1.200	12,77	Compra
6	Turismo	1	2014	60.000	9.300	1.200	12,90	Compra
7	Motocicleta	2	2009	80.000	6.100	900	14,75	Compra
8	Motocicleta	2	2010	72.000	6.200	890	14,35	Compra
9	Motocicleta	2	2010	55.000	6.400	920	14,38	Compra
10	Turismo	2	2005	180.000	10.500	1.300	12,38	Compra
11	Turismo	2	2008	130.000	9.500	1.100	11,58	Compra
12	Turismo	2	2011	100.000	11.000	1.350	12,27	Compra
13	Motocicleta	3	2014	32.000	3.800	550	14,47	Compra
14	Motocicleta	3	2015	26.000	3.900	560	14,36	Compra
15	Motocicleta	3	2018	10.000	4.300	610	14,19	Compra
16	Turismo	3	2006	133.000	8.500	1.050	12,35	Compra
17	Turismo	3	2009	115.000	8.700	1.130	12,99	Compra
18	Turismo	3	2014	55.000	8.700	1.080	12,41	Compra
19	Motocicleta	4	2012	50.000	4.400	630	14,32	Compra
20	Motocicleta	4	2014	30.000	4.600	650	14,13	Compra
21	Motocicleta	4	2014	34.000	4.500	620	13,78	Compra
22	Turismo	4	2010	120.000	9.600	1.300	13,54	Compra
23	Turismo	4	2016	60.000	9.900	1.200	12,12	Compra
24	Turismo	4	2018	27.000	10.300	1.150	11,17	Compra
25	Motocicleta	5	2017	20.000	4.100	700	17,07	Compra
26	Motocicleta	5	2019	11.000	4.200	690	16,43	Compra
27	Motocicleta	5	2021	0	4.500	720	16,00	Compra
28	Turismo	5	2015	48.000	7.300	1.100	15,07	Compra
29	Turismo	5	2018	26.000	7.700	1.100	14,29	Compra
30	Turismo	5	2020	10.000	8.000	1.150	14,38	Compra

La siguiente tabla recoge los vehículos disponibles en el mercado. Se han elegido un vehículo diésel y otro eléctrico para cada tipo de vehículo y ruta. La ruta 3 y 4 y la 1 y 5 comparten el mismo vehículo disponible en el mercado puesto que son rutas que requieren de vehículos similares para realizar el reparto.

Tabla 63: Simulación Replicabilidad: Datos de los vehículos en el mercado

Marca	Modelo	Tipo	Tamaño	Tipo de Ruta	Valor Adquisición / Cuota mensual	Valor Mantenimiento (Anual)	Valor Seguro (Anual)	Tasas de circulación (Anual)	Peajes (Anual)	Valor Residual	Consumo Combustible (l/100km)	Consumo Eléctrico (kWh/100km)	Otros costes de inversión	Otros costes anuales	Compra o Alquiler	Subsidio	Amortización
Kymco	Agility	Diésel	Motocicleta	1	4.000 €	200 €	300 €	60 €	100 €	200 €	13,8	0	0 €	0 €	Compra	0 €	7
Silence	eSS	Eléctrico	Motocicleta	1	9.000 €	100 €	300 €	0 €	25 €	350 €	0,0	50	300 €	0 €	Compra	800 €	7
Honda	PCX	Diésel	Motocicleta	2	6.000 €	100 €	300 €	60 €	100 €	400 €	13,2	0	0 €	0 €	Compra	0 €	7
Honda	ePCX	Eléctrico	Motocicleta	2	12.000 €	50 €	300 €	0 €	25 €	800 €	0,0	35	300 €	0 €	Compra	1.000 €	7
Yamaha	NMAX	Diésel	Motocicleta	3	5.000 €	300 €	300 €	60 €	100 €	400 €	13,5	0	0 €	0 €	Compra	0 €	7
SVM	eSymphony	Eléctrico	Motocicleta	3	14.000 €	100 €	300 €	0 €	25 €	600 €	0,0	40	300 €	0 €	Compra	800 €	7
Yamaha	NMAX	Diésel	Motocicleta	4	5.000 €	300 €	300 €	60 €	100 €	400 €	13,5	0	0 €	0 €	Compra	0 €	7
SVM	eSymphony	Eléctrico	Motocicleta	4	10.000 €	100 €	300 €	0 €	25 €	600 €	0,0	40	300 €	0 €	Compra	800 €	7
Kymco	Agility	Diésel	Motocicleta	5	4.000 €	200 €	300 €	60 €	100 €	200 €	13,8	0	0 €	0 €	Compra	0 €	7
Silence	eSS	Eléctrico	Motocicleta	5	8.000 €	100 €	300 €	0 €	25 €	350 €	0,0	50	300 €	0 €	Compra	800 €	7
Citroen	Jumpy	Diésel	Turismo	1	20.000 €	400 €	500 €	80 €	150 €	1.500 €	11,3	0	0 €	0 €	Compra	0 €	7
Citroen	eJumpy	Eléctrico	Turismo	1	26.000 €	300 €	500 €	0 €	50 €	1.900 €	0,0	50	400 €	0 €	Compra	1.300 €	7
Nissan	NCV	Diésel	Turismo	2	32.000 €	600 €	500 €	80 €	150 €	1.800 €	12,1	0	0 €	0 €	Compra	0 €	7
Nissan	eNCV	Eléctrico	Turismo	2	44.000 €	400 €	500 €	0 €	50 €	2.400 €	0,0	30	400 €	0 €	Compra	1.700 €	7
Ford	Transit	Diésel	Turismo	3	25.000 €	500 €	500 €	80 €	150 €	1.500 €	11,3	0	0 €	0 €	Compra	0 €	7
Ford	eTransit	Eléctrico	Turismo	3	34.000 €	300 €	500 €	0 €	50 €	1.900 €	0,0	45	400 €	0 €	Compra	1.300 €	7
Ford	Transit	Diésel	Turismo	4	25.000 €	500 €	500 €	80 €	150 €	1.500 €	11,3	0	0 €	0 €	Compra	0 €	7
Ford	eTransit	Eléctrico	Turismo	4	34.000 €	300 €	500 €	0 €	50 €	1.900 €	0,0	45	400 €	0 €	Compra	1.300 €	7
Citroen	Jumpy	Diésel	Turismo	5	20.000 €	400 €	500 €	80 €	150 €	1.500 €	11,3	0	0 €	0 €	Compra	0 €	7
Citroen	eJumpy	Eléctrico	Turismo	5	26.000 €	300 €	500 €	0 €	50 €	1.900 €	0,0	50	400 €	0 €	Compra	1.300 €	7

4.2.1.2 Estudio económico

Una vez terminada la simulación, se procede a analizar los resultados de este caso de estudio. La siguiente tabla muestra el NPV de cada vehículo del mercado en cada año del estudio en el que puede ser comprado. El orden de los vehículos es el mismo que el de la tabla con la información de los vehículos del mercado, siendo los índices impares automóviles diésel y los pares eléctricos.

Como se ha explicado en la metodología, el precio de adquisición del vehículo disminuye año tras año y, consecuentemente, el NPV del vehículo. Esta disminución se produce hasta 2030, punto en el que se considera que la tecnología habrá llegado a su punto de madurez y no habrá cambios significantes en el precio.

Por otro lado, en la tabla se observa el punto en que cada categoría alcanza la paridad. Este punto se consigue cuando los NPV del vehículo diésel y eléctrico son iguales. En este estudio la paridad de las categorías no se alcanza hasta los últimos años del estudio o, en algunos casos, no se alcanza a lo largo del estudio. Por ejemplo, los vehículos con índice 1 y 2 nunca la alcanzan, pero los de índice 7 y 8 se alcanzan en el año 2027.

Tabla 64: Simulación Replicabilidad: NPV de los vehículos del mercado

Año Estudio / Vehículo Mercado	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
1 -	11.846 €	11.846 €	11.846 €	11.846 €	11.846 €	11.846 €	11.846 €	11.846 €	11.846 €	11.846 €	11.846 €	11.846 €
2 -	14.094 €	13.155 €	13.029 €	12.914 €	12.808 €	12.710 €	12.619 €	12.534 €	12.456 €	12.456 €	12.456 €	12.456 €
3 -	12.669 €	12.669 €	12.669 €	12.669 €	12.669 €	12.669 €	12.669 €	12.669 €	12.669 €	12.669 €	12.669 €	12.669 €
4 -	15.123 €	13.952 €	13.798 €	13.656 €	13.527 €	13.406 €	13.295 €	13.191 €	13.095 €	13.095 €	13.095 €	13.095 €
5 -	13.121 €	13.121 €	13.121 €	13.121 €	13.121 €	13.121 €	13.121 €	13.121 €	13.121 €	13.121 €	13.121 €	13.121 €
6 -	17.730 €	16.653 €	16.402 €	16.172 €	15.960 €	15.765 €	15.583 €	15.415 €	15.257 €	15.257 €	15.257 €	15.257 €
7 -	13.121 €	13.121 €	13.121 €	13.121 €	13.121 €	13.121 €	13.121 €	13.121 €	13.121 €	13.121 €	13.121 €	13.121 €
8 -	14.130 €	13.281 €	13.236 €	13.194 €	13.156 €	13.121 €	12.966 €	12.820 €	12.684 €	12.684 €	12.684 €	12.684 €
9 -	11.846 €	11.846 €	11.846 €	11.846 €	11.846 €	11.846 €	11.846 €	11.846 €	11.846 €	11.846 €	11.846 €	11.846 €
10 -	13.194 €	12.316 €	12.245 €	12.181 €	12.121 €	12.066 €	12.015 €	11.968 €	11.924 €	11.924 €	11.924 €	11.924 €
11 -	27.379 €	27.379 €	27.379 €	27.379 €	27.379 €	27.379 €	27.379 €	27.379 €	27.379 €	27.379 €	27.379 €	27.379 €
12 -	30.911 €	29.217 €	28.860 €	28.533 €	28.233 €	27.956 €	27.698 €	27.459 €	27.151 €	27.151 €	27.151 €	27.151 €
13 -	39.442 €	39.442 €	39.442 €	39.442 €	39.442 €	39.442 €	39.442 €	39.442 €	39.442 €	39.442 €	39.442 €	39.442 €
14 -	46.014 €	43.533 €	42.824 €	42.175 €	41.579 €	41.028 €	40.517 €	40.041 €	39.597 €	39.597 €	39.597 €	39.597 €
15 -	32.509 €	32.509 €	32.509 €	32.509 €	32.509 €	32.509 €	32.509 €	32.509 €	32.509 €	32.509 €	32.509 €	32.509 €
16 -	37.781 €	35.867 €	35.311 €	34.801 €	34.333 €	33.900 €	33.499 €	33.125 €	32.777 €	32.777 €	32.777 €	32.777 €
17 -	32.509 €	32.509 €	32.509 €	32.509 €	32.509 €	32.509 €	32.509 €	32.509 €	32.509 €	32.509 €	32.509 €	32.509 €
18 -	37.781 €	35.867 €	35.311 €	34.801 €	34.333 €	33.900 €	33.499 €	33.125 €	32.777 €	32.777 €	32.777 €	32.777 €
19 -	27.379 €	27.379 €	27.379 €	27.379 €	27.379 €	27.379 €	27.379 €	27.379 €	27.379 €	27.379 €	27.379 €	27.379 €
20 -	30.911 €	29.217 €	28.860 €	28.533 €	28.233 €	27.956 €	27.698 €	27.459 €	27.151 €	27.151 €	27.151 €	27.151 €

La siguiente tabla muestra los vehículos que hay que retirar de la flota y los que hay que incorporar para sustituirlos. Cada año se retiran 2 vehículos, ya que la tasa de reemplazo se ha fijado en 7%. Por tanto, se reemplazan un total de 24 vehículos de los 30 totales que tiene la flota. Entre ellos se encuentran los dos tipos de vehículos que hay en ella: motocicletas y turismos de todas las rutas que ha definido el usuario. Inicialmente se

retiran más turismos al tener más kilómetros que las motocicletas, aunque con el paso de los años se renuevan ambas categorías.

Los vehículos para incorporar se eligen en función de la categoría del vehículo: por su tamaño y su tipo de ruta. En la tabla pueden verse automóviles eléctricos y diésel que, en combinación con el resto de la flota, consiguen el 30% de reducción de emisiones necesario. Al principio del estudio se incorporan más vehículos diésel puesto que la tecnología no se ha desarrollado lo suficiente y los precios siguen siendo demasiado altos. Conforme pasan los años del estudio, cada vez son más los vehículos eléctricos que se incorporan a la flota.

Tabla 65: Simulación Replicabilidad: Vehículos a retirar e incorporar en cada año del estudio

Año	Identificador	Tamaño	Ruta	Identificador Nuevo	Marca	Modelo	Tipo	NPV
2022	4	Turismo	1	30	Citroen	Jumpy	Diésel	- 27.379 €
	10	Turismo	2	31	Nissan	NCV	Diésel	- 39.442 €
2023	16	Turismo	3	32	Ford	Transit	Diésel	- 32.509 €
	17	Turismo	3	33	Ford	Transit	Diésel	- 32.509 €
2024	7	Motocicleta	2	34	Honda	PCX	Diésel	- 12.669 €
	11	Turismo	2	35	Nissan	NCV	Diésel	- 39.442 €
2025	1	Motocicleta	1	36	Kymco	Agility	Diésel	- 11.846 €
	22	Turismo	4	37	Ford	Transit	Diésel	- 32.509 €
2026	5	Turismo	1	38	Citroen	Jumpy	Diésel	- 27.379 €
	8	Motocicleta	2	39	Honda	PCX	Diésel	- 12.669 €
2027	2	Motocicleta	1	40	Kymco	Agility	Diésel	- 11.846 €
	19	Motocicleta	4	41	SYM	eSymphony	Eléctrico	- 13.121 €
2028	3	Motocicleta	1	42	Kymco	Agility	Diésel	- 11.846 €
	12	Turismo	2	43	Nissan	NCV	Diésel	- 39.442 €
2029	9	Motocicleta	2	44	Honda	PCX	Diésel	- 12.669 €
	13	Motocicleta	3	45	Yamaha	NMAX	Diésel	- 13.121 €
2030	21	Motocicleta	4	46	SYM	eSymphony	Eléctrico	- 12.684 €
	28	Turismo	5	47	Citroen	eJumpy	Eléctrico	- 27.151 €
2031	14	Motocicleta	3	48	Yamaha	NMAX	Diésel	- 13.121 €
	20	Motocicleta	4	49	SYM	eSymphony	Eléctrico	- 12.684 €
2032	6	Turismo	1	50	Citroen	eJumpy	Eléctrico	- 27.151 €
	25	Motocicleta	5	51	Silence	eSS	Eléctrico	- 11.924 €
2033	18	Turismo	3	52	Ford	eTransit	Eléctrico	- 32.777 €
	23	Turismo	4	53	Ford	eTransit	Eléctrico	- 32.777 €

La siguiente tabla es un resumen anual del estudio económico del caso base. En ella se muestra lo que la empresa debe invertir en NPV cada año del estudio, así como la distribución del coste total en cada uno de los años. Cabe destacar que el NPV a gastar cada año varía entre un 5% y un 12% del total. Esta variación económica dependiendo del año dificulta el proceso de reemplazo para la empresa, puesto que se vuelve menos estable y es más difícil mantener un cash flow constante. El mayor NPV anual se alcanza en el primer año del estudio donde la empresa tiene que gastar un total de 66.821,29 €. Por el contrario, el año que menos se gasta es en el 2027 con 24.967,62 €.

Tabla 66: Simulación Replicabilidad: Resumen de los resultados del estudio económico

Año	NPV Año	NPV Acumulado	% NPV	% NPV Acumulado
2022	- 66.821 €	- 66.821 €	12%	12%
2023	- 65.019 €	- 131.840 €	12%	24%
2024	- 52.111 €	- 183.951 €	10%	34%
2025	- 44.356 €	- 228.307 €	8%	42%
2026	- 40.048 €	- 268.355 €	7%	50%
2027	- 24.968 €	- 293.323 €	5%	54%
2028	- 51.288 €	- 344.611 €	9%	64%
2029	- 25.790 €	- 370.401 €	5%	69%
2030	- 39.835 €	- 410.236 €	7%	76%
2031	- 25.805 €	- 436.041 €	5%	81%
2032	- 39.075 €	- 475.116 €	7%	88%
2033	- 65.554 €	- 540.670 €	12%	100%

El NPV total del estudio es de 540.669,56 € que lograrán cumplir el objetivo de reducción de emisiones impuesto para 2032 en la ciudad. Esta opción es la más económica para la empresa si quiere lograr el objetivo marcado.

4.2.1.3 Estudio medioambiental

Una vez analizado los resultados económicos, se procede al análisis de los resultados medioambientales. Para ello se mostrarán distintas gráficas y tablas que reflejan la información más relevante del estudio.

En primer lugar, se muestran dos gráficas donde en el eje Y se muestra el % de reducción de emisiones total del estudio y en el eje X el NPV total del estudio. La diferencia entre la gráfica situada a la izquierda y la situada a la derecha es la siguiente. La gráfica de la izquierda representa el NPV dual de la solución, es decir, incluyendo el precio sombra (λ) dado a las emisiones de cada vehículo, mientras que la gráfica de la derecha muestra el NPV real de la simulación.

Como se ha explicado en la metodología, se hace uso del precio sombra para las emisiones de CO₂ para poder incluir las restricciones de emisiones en la función objetivo del coste total del estudio. Todos los puntos representados en la misma línea horizontal corresponden a la misma combinación de vehículos, pero tienen distintos NPV debido a que λ varía su valor en cada iteración. Sin embargo, en la gráfica de la derecha los puntos se superponen ya que, al no tener en cuenta el precio sombra, tienen el mismo NPV total.

Analizando el gráfico, se saca la conclusión que, para aumentar la reducción de emisiones, el gasto que debe hacer la empresa es desproporcionadamente mayor. La solución se encuentra cercana a la de NPV mínimo que tiene una reducción del 24%. Para conseguir lograr el 30% de reducción de emisiones, la empresa deberá aumentar ligeramente su gasto, al tener que incorporar más vehículos eléctricos. Si se quisieran alcanzar más del 35% de reducción, la empresa debería de destinar mucho más dinero para ello, pudiendo ser prácticamente inasumible para una empresa pequeña.

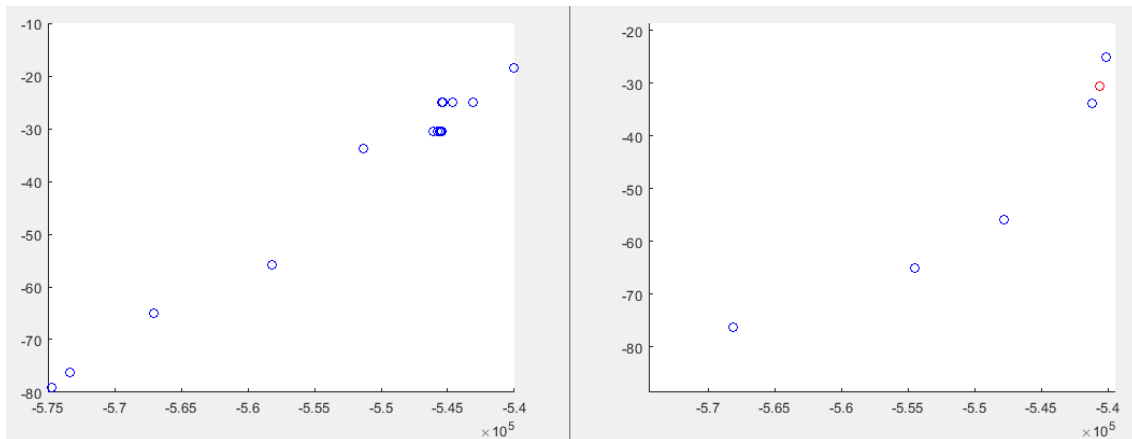


Figura 25: Simulación Replicabilidad: Gráfico de dispersión de las soluciones

La siguiente tabla muestra el resumen de las emisiones producidas por el conjunto de vehículos que componen la flota. En ella, se puede observar el tanto por ciento de emisiones que se reducen a lo largo del estudio. Del 30,52% que disminuyen en los 12 años del estudio, en los 8 primeros años solo se reduce un 6,73% mientras que en los 3 últimos años se reducen el 23,79% restante. Esto quiere decir que la mayor parte de la reducción ocurre durante los últimos años del estudio. En un análisis práctico, esta solución tendría sentido al tener la tecnología más desarrollada y los precios más económicos conforme transcurren los años del estudio.

Tabla 67: Simulación Replicabilidad: Resumen de los resultados del estudio medioambiental

Año	Emisiones Año	% Reducción Emisiones
2021	92475	0,00%
2022	92236	0,26%
2023	91623	0,92%
2024	91392	1,17%
2025	90646	1,98%
2026	90060	2,61%
2027	86804	6,13%
2028	86729	6,21%
2029	86248	6,73%
2030	79796	13,71%
2031	76443	17,34%
2032	69738	24,59%
2033	64250	30,52%

La simulación termina con una reducción total de emisiones en 9 años de estudio del -30,52% superando la reducción requerida en los parámetros del estudio (30%). La empresa de reparto de comida de Río de Janeiro podrá lograr la reducción de emisiones impuesta por el gobierno de la ciudad.

4.3 Escalabilidad

La palabra escalabilidad se define como la capacidad de adaptación y respuesta de un sistema con respecto al rendimiento del mismo a medida que aumentan o disminuyen del número de componentes del sistema. El aspecto clave de la escalabilidad es que el sistema no pierda cualidades que le den valor al tratar con un número de componentes demasiado bajo o alto.

Para que un proyecto sea escalable debe de tener dos características fundamentales con el fin de poder ser global y adaptable a cualquier entorno. En primer lugar, el sistema debe de ser fácil de enseñar lo que permitirá que más usuarios lo utilicen y puedan beneficiarse de ello. La segunda es que el sistema debe ser replicable para lograr reproducir el modo de funcionamiento de este en cualquier entorno.

Existen dos tipos de escalabilidad: vertical y horizontal. La primera de ellas se refiere a actualizaciones del sistema con el fin de poder ser gestionado de forma más eficiente y productiva. Por otro lado, la escalabilidad horizontal (size scalability) se refiere a la posibilidad de aumentar el número de componentes que forman el sistema. En este ejemplo, el tipo de escalabilidad que se ha considerado es de tipo horizontal puesto que la herramienta es capaz de gestionar mayor o menor número de vehículos sin que se vean mermadas sus capacidades.

La escalabilidad de este proyecto se centra en dos dimensiones. La primera de ellas es la dimensión geográfica dotando a la herramienta de una flexibilidad para que la puedan utilizar los usuarios sin importar donde se encuentra la empresa o el usuario que la utiliza. Esto permite el uso del software sin que se vea afectada su utilidad y usabilidad. La segunda dimensión es la administrativa que permite emplear la herramienta independientemente de cómo de diferentes sean las compañías que necesitan hacer uso de él.

Para que un sistema se pueda considerar escalable, la herramienta debe de ser fácil de usar y de manejar. Por ello, el usuario se comunica con el software a través de un Excel donde deberá de introducir todos los datos relacionados con la empresa, su flota y el entorno. De esta forma, el usuario no deberá acceder al código informático que no tiene por qué saber manejar. Cuando la simulación ha terminado, los resultados del estudio son presentados en un Excel para la comodidad del usuario y su posterior análisis.

La escalabilidad del sistema debe comenzar durante el desarrollo de este, atendiendo a los requerimientos que tendrá la herramienta. Se debe de tener en consideración factores como el crecimiento de la herramienta y los límites de esta ante diferentes situaciones. Estas decisiones tienen que verse reflejadas en los requerimientos y en el desarrollo del software puesto que marcan la necesidad de la herramienta para que se adapte correctamente ante cualquier uso.

Por ello, la herramienta puede ser utilizada por empresas con una menor o mayor cantidad de vehículos. También puede utilizarse para estudiar globalmente varias delegaciones de la empresa, aunque sean muy diferentes entre sí. Por ejemplo, una compañía multinacional podría estudiar la flota de sus distintos países a la vez, aunque los mercados

y las necesidades sean diferentes entre sí. En el siguiente ejemplo se podrá ver claramente este caso.

4.3.1 Simulación de escalabilidad

A continuación, se mostrará un caso de estudio donde se muestre la escalabilidad del sistema. Para ello, se aprovechará el caso base del capítulo 3 donde se analizó la flota de vehículos de Loomis. Este estudio se realizó sobre la flota de vehículos de Madrid, la cual la componen 60 vehículos categorizados en tres tamaños (pequeño, mediano y grande) y tres tipos de ruta (1,2 y 3).

Este nuevo caso de estudio abarcará la flota de vehículos en Madrid, España y en Estocolmo, Suecia, donde se encuentra la sede de la empresa. Por tanto, habrá que añadir la información de la flota de Estocolmo al estudio. Esta flota es diferente a la de Madrid puesto que en cada país la normativa y la necesidad hace que los vehículos sean diferentes. En el caso de Suecia, los vehículos que se utilizan no son blindados si no que llevan otros sistemas de protección para proteger el bien que se transporta. Por tanto, la categorización de los vehículos según el tamaño será diferente a la de Madrid. Por otro lado, los tipos de ruta en Estocolmo se dividen en 4 tipos según la zona geográfica que abarquen. Este sistema difiere del utilizado en Madrid donde se categorizan según la longitud de las rutas.

En resumen, las categorías necesarias en la flota de Estocolmo son las siguientes:

Tamaños:

- Liten: vehículos no blindados con un tonelaje menor a 5 toneladas
- Stor: vehículos no blindados con un tonelaje mayor a 5 toneladas

Rutas:

- Ruta 4: ruta por la zona norte de Estocolmo
- Ruta 5: ruta por la zona sur de Estocolmo
- Ruta 6: ruta por la zona oeste de Estocolmo
- Ruta 7: ruta por la zona este de Estocolmo

La flota de vehículos de Estocolmo la componen 30 vehículos, la mitad que en Madrid. Estos automóviles son más nuevos, pero realizan más kilómetros al año puesto que abarcan mayores distancias y los clientes están más separados entre sí. Para diferenciar las flotas, los identificadores de los vehículos de Estocolmo serán del 1 al 30 y los identificadores nuevos empezarán desde el 30. De los 30 vehículos que tiene la flota de Estocolmo, 3 de ellos son eléctricos.

Tabla 68: Simulación Escalabilidad: Datos de la flota actual

Identificador	Tamaño	Tipo Ruta	Año Matriculación	Kilometros Totales	Kilómetros 2020	Diesel 2020	Consumo 2020	Alquiler o Compra
760	Pequeño	3	2007	531.320	9.557	1.937	20,27	Compra
772	Pequeño	2	2008	426.527	11.127	2.657	23,88	Compra
775	Grande	3	2008	124.674	4.370	1.034	23,66	Compra
781	Pequeño	1	2008	497.356	35.284	5.977	16,94	Compra
784	Pequeño	3	2008	566.570	35.488	6.129	17,27	Compra
785	Pequeño	3	2008	643.132	20.940	4.252	20,31	Compra
793	Pequeño	1	2008	495.410	37.470	5.610	14,97	Compra
799	Grande	3	2008	542.438	23.902	4.878	20,41	Compra
809	Mediano	1	2009	543.730	24.250	4.751	19,59	Compra
811	Mediano	2	2009	502.799	25.415	4.846	19,07	Compra
822	Grande	1	2009	933.971	97.098	14.997	15,44	Compra
849	Grande	2	2010	714.063	64.638	10.594	16,39	Compra
852	Grande	3	2010	448.330	24.358	5.232	21,48	Compra
856	Mediano	1	2010	411.494	19.574	4.111	21	Compra
882	Mediano	1	2011	442.485	27.426	5.665	20,66	Compra
884	Mediano	3	2011	457.300	38.189	6.608	17,3	Compra
893	Pequeño	2	2011	445.973	44.660	7.663	17,16	Compra
900	Mediano	3	2011	422.041	30.198	6.138	20,33	Compra
927	Pequeño	3	2008	466.114	9.190	2.202	23,96	Compra
929	Pequeño	2	2011	230.570	14.823	2.999	20,23	Compra
964	Mediano	2	2012	320.778	23.232	4.029	17,34	Compra
1010	Mediano	2	2014	316.286	31.640	4.872	15,4	Compra
1011	Mediano	3	2014	308.502	23.992	4.294	17,9	Compra
1015	Mediano	3	2014	276.175	39.225	6.990	17,82	Compra
1017	Mediano	3	2014	281.408	34.246	7.111	20,77	Compra
1019	Pequeño	1	2015	212.648	27.927	5.394	19,32	Compra
1503	Mediano	1	2015	254.264	41.266	6.245	15,13	Compra
1517	Mediano	1	2016	205.123	32.459	5.496	16,93	Compra
1518	Mediano	2	2015	249.804	43.662	7.144	16,36	Compra
1523	Mediano	3	2015	226.400	27.427	4.743	17,29	Compra
1533	Mediano	1	2016	71.028	13.313	0	0	Compra
1536	Mediano	3	2015	231.245	32.022	5.463	17,06	Compra
1537	Mediano	2	2015	232.604	43.356	7.070	16,31	Compra
1539	Mediano	1	2015	233.528	40.112	7.130	17,77	Compra
1613	Mediano	1	2016	187.378	30.197	4.914	16,27	Compra
1614	Mediano	3	2017	171.582	38.798	6.526	16,82	Compra
1623	Mediano	2	2017	182.405	46.035	8.046	17,48	Compra
1635	Mediano	1	2018	85.147	9.348	1.928	20,62	Compra
1703	Mediano	1	2017	152.270	45.472	8.065	17,74	Compra
1709	Mediano	3	2017	139.320	38.133	7.964	20,88	Compra
1717	Mediano	2	2017	137.514	31.719	6.432	20,28	Compra
1721	Mediano	1	2017	150.448	44.874	7.447	16,59	Compra
1724	Mediano	2	2017	135.465	33.196	6.263	18,87	Compra
1728	Mediano	2	2019	35.882	35.882	6.151	17,14	Compra
1731	Mediano	2	2019	45.559	23.829	4.365	18,32	Compra
1733	Pequeño	2	2018	88.439	26.341	4.718	17,91	Compra
1734	Pequeño	3	2018	92.269	33.450	5.432	16,24	Compra
1805	Mediano	3	2019	66.932	30.939	5.649	18,26	Compra
1809	Mediano	3	2019	57.166	26.152	3.864	14,77	Compra
1810	Mediano	1	2019	73.290	43.352	7.835	18,07	Compra
1815	Mediano	3	2019	76.589	44.399	7.828	17,63	Compra
1816	Mediano	3	2019	81.993	41.769	6.857	16,42	Compra
1817	Mediano	3	2019	58.478	30.132	5.808	19,28	Compra
1829	Mediano	2	2020	10.030	10.030	1.499	14,95	Compra
1932	Mediano	3	2020	40.373	40.373	6.982	17,29	Compra
1943	Pequeño	3	2020	8.466	8.466	1.241	14,66	Compra
1946	Pequeño	3	2020	3.952	3.952	453	11,46	Compra
1947	Mediano	3	2020	38.110	38.110	5.248	13,77	Compra
1949	Mediano	2	2020	42.797	42.797	7.382	17,25	Compra
1950	Mediano	3	2020	42.102	42.102	6.771	16,08	Compra
1	Liten	4	2013	750.000	58.790	7.943	13,51	Compra
2	Liten	6	2014	550.000	56.229	6.990	12,43	Compra
3	Liten	4	2014	430.000	60.332	7.840	12,99	Compra
4	Liten	6	2016	360.000	59.628	7.623	12,78	Compra
5	Liten	6	2016	370.000	63.745	7.982	12,52	Compra
6	Liten	5	2018	240.000	70.308	8.398	11,94	Compra
7	Liten	6	2018	250.000	73.534	8.618	11,72	Compra
8	Liten	7	2018	200.000	71.256	8.570	12,03	Compra
9	Liten	4	2018	220.000	68.903	8.197	11,90	Compra
10	Liten	7	2019	120.000	73.083	8.921	12,21	Compra
11	Liten	6	2020	70.000	87.105	9.963	11,44	Compra
12	Liten	5	2020	80.000	91.768	10.837	11,81	Compra
13	Liten	6	2021	0	86.192	0	0	Compra
14	Stor	6	2012	656.000	58.730	9.524	16,22	Compra
15	Stor	7	2010	870.000	61.940	9.487	15,32	Compra
16	Stor	6	2011	760.000	62.006	9.346	15,07	Compra
17	Stor	4	2013	640.000	62.510	9.350	14,96	Compra
18	Stor	7	2013	650.000	63.468	9.601	15,13	Compra
19	Stor	4	2013	690.000	61.222	9.178	14,99	Compra
20	Stor	6	2015	410.000	63.054	9.473	15,02	Compra
21	Stor	4	2016	430.000	90.435	13.500	14,93	Compra
22	Stor	6	2017	330.000	89.166	13.295	14,91	Compra
23	Stor	4	2017	340.000	90.470	12.795	14,14	Compra
24	Stor	5	2018	290.000	92.461	14.112	15,26	Compra
25	Stor	6	2018	280.000	92.597	13.992	15,11	Compra
26	Stor	5	2018	290.000	92.846	13.954	15,03	Compra
27	Stor	4	2019	190.000	109.941	16.781	15,26	Compra
28	Stor	7	2020	56.000	69.000	0	0	Compra
29	Stor	6	2020	105.000	112.419	16.684	14,84	Compra
30	Stor	6	2021	0	67.000	0	0	Compra

Replicabilidad y Escalabilidad a otros sectores y entornos

Los datos de los vehículos del mercado también difieren entre las delegaciones. Los precios de los automóviles en Suecia son superiores a los de España y la diferencia de precio entre los vehículos eléctricos y diésel es más grande. Además, los subsidios en el país nórdico son considerablemente mayores que en España ya que están más concienciados con el medioambiente en la sociedad. Cabe destacar que el valor residual de los vehículos en Suecia es mucho mayor que en España puesto que el mercado de segunda mano es mucho más grande para vehículos sin blindaje que para vehículos blindados.

Tabla 69: Simulación Escalabilidad: Datos de los vehículos en el mercado

Marca	Modelo	Tipo	Tamaño	Tipo de Ruta	Valor Adquisición / Coste mensual	Valor Mantenimiento (Anual)	Valor Seguro (Anual)	Tasas de circulación (Anual)	Pesajes (Anual)	Valor Residual	Consumo Combustible (/100km)	Consumo Eléctrico (kWh/100km)	Otros costes de inversión	Otros costes anuales	Compra o Alquiler	Subsidio	Amortización	
Iveco	Daily	Diésel	Mediano	1	80.000 €	400 €	1.000 €	150 €	100 €	1.000 €	17,5	0	0 €	0 €	0 €	Compra	0 €	7
Iveco	E-Daily	Eléctrico	Mediano	1	120.000 €	200 €	1.000 €	50 €	0 €	1.200 €	0	40	0 €	0 €	0 €	Compra	2.500 €	7
Citroen	Jumpy	Diésel	Pequeño	1	20.000 €	200 €	500 €	100 €	100 €	500 €	10	0	0 €	0 €	0 €	Compra	0 €	7
Citroen	e-Jumpy	Eléctrico	Pequeño	1	30.000 €	100 €	500 €	0 €	0 €	800 €	0	30	0 €	0 €	0 €	Compra	2.000 €	7
MAN	TGM	Diésel	Grande	1	150.000 €	800 €	1.200 €	200 €	100 €	1.500 €	20	0	0 €	0 €	0 €	Compra	0 €	7
MAN	eTGM	Eléctrico	Grande	1	230.000 €	500 €	1.200 €	100 €	0 €	1.300 €	0	50	0 €	0 €	0 €	Compra	2.800 €	7
VW	Daily	Diésel	Mediano	2	80.000 €	400 €	1.000 €	150 €	100 €	1.000 €	17,5	0	0 €	0 €	0 €	Compra	0 €	7
VW	E-Daily	Eléctrico	Mediano	2	120.000 €	200 €	1.000 €	50 €	0 €	1.200 €	0	40	0 €	0 €	0 €	Compra	2.500 €	7
Seat	Jumpy	Diésel	Pequeño	2	20.000 €	200 €	500 €	100 €	100 €	500 €	10	0	0 €	0 €	0 €	Compra	0 €	7
Seat	e-Jumpy	Eléctrico	Pequeño	2	30.000 €	100 €	500 €	0 €	0 €	800 €	0	30	0 €	0 €	0 €	Compra	2.000 €	7
Tesla	TGM	Diésel	Grande	2	150.000 €	800 €	1.200 €	200 €	100 €	1.500 €	20	0	0 €	0 €	0 €	Compra	0 €	7
Tesla	eTGM	Eléctrico	Grande	2	230.000 €	500 €	1.200 €	100 €	0 €	1.300 €	0	50	0 €	0 €	0 €	Compra	2.800 €	7
Nissan	Daily	Diésel	Mediano	3	80.000 €	400 €	1.000 €	150 €	100 €	1.000 €	17,5	0	0 €	0 €	0 €	Compra	0 €	7
Nissan	E-Daily	Eléctrico	Mediano	3	120.000 €	200 €	1.000 €	50 €	0 €	1.200 €	0	40	0 €	0 €	0 €	Compra	2.500 €	7
Renault	Jumpy	Diésel	Pequeño	3	20.000 €	200 €	500 €	100 €	100 €	500 €	10	0	0 €	0 €	0 €	Compra	0 €	7
Renault	e-Jumpy	Eléctrico	Pequeño	3	30.000 €	100 €	500 €	0 €	0 €	800 €	0	30	0 €	0 €	0 €	Compra	2.000 €	7
Volta	TGM	Diésel	Grande	3	150.000 €	800 €	1.200 €	200 €	100 €	1.500 €	20	0	0 €	0 €	0 €	Compra	0 €	7
Volta	eTGM	Eléctrico	Grande	3	230.000 €	500 €	1.200 €	100 €	0 €	1.300 €	0	50	0 €	0 €	0 €	Compra	2.800 €	7
Nissan	NCV	Diésel	Liten	4	60.000 €	1.400 €	2.300 €	300 €	200 €	2.000 €	11,9	0	0 €	0 €	0 €	Compra	0 €	5
Nissan	eNCV	Eléctrico	Liten	4	90.000 €	900 €	2.300 €	100 €	0 €	2.700 €	0	39	0 €	0 €	0 €	Compra	4.100 €	5
Renault	Kangoo	Diésel	Liten	5	55.000 €	1.400 €	2.300 €	300 €	200 €	2.000 €	11,8	0	0 €	0 €	0 €	Compra	0 €	5
Renault	eKangoo	Eléctrico	Liten	5	85.000 €	900 €	2.300 €	100 €	0 €	2.700 €	0	37	0 €	0 €	0 €	Compra	4.100 €	5
Mercedes	Vito	Diésel	Liten	6	65.000 €	1.400 €	2.300 €	300 €	200 €	2.000 €	11,6	0	0 €	0 €	0 €	Compra	0 €	5
Mercedes	eVito	Eléctrico	Liten	6	98.000 €	900 €	2.300 €	100 €	0 €	2.700 €	0	35	0 €	0 €	0 €	Compra	4.100 €	5
Mercedes	Vito	Diésel	Liten	7	65.000 €	1.400 €	2.300 €	300 €	200 €	2.000 €	11,6	0	0 €	0 €	0 €	Compra	0 €	5
Mercedes	eVito	Eléctrico	Liten	7	98.000 €	900 €	2.300 €	100 €	0 €	2.700 €	0	35	0 €	0 €	0 €	Compra	4.100 €	5
Ford	Transit	Diésel	Stor	4	95.000 €	2.100 €	2.700 €	400 €	300 €	2.300 €	14,4	0	0 €	0 €	0 €	Compra	0 €	5
Ford	eTransit	Eléctrico	Stor	4	135.000 €	1.300 €	2.700 €	125 €	0 €	3.000 €	0	45	0 €	0 €	0 €	Compra	5.600 €	5
Dacia	Dokker	Diésel	Stor	5	103.000 €	2.100 €	2.700 €	400 €	300 €	2.300 €	14,6	0	0 €	0 €	0 €	Compra	0 €	5
Dacia	eDokker	Eléctrico	Stor	5	145.000 €	1.300 €	2.700 €	125 €	0 €	3.000 €	0	48	0 €	0 €	0 €	Compra	5.600 €	5
Opel	Combo	Diésel	Stor	6	78.000 €	2.100 €	2.700 €	400 €	300 €	2.300 €	14,3	0	0 €	0 €	0 €	Compra	0 €	5
Opel	eCombo	Eléctrico	Stor	6	130.000 €	1.300 €	2.700 €	125 €	0 €	3.000 €	0	44	0 €	0 €	0 €	Compra	5.600 €	5
Opel	Combo	Diésel	Stor	7	78.000 €	2.100 €	2.700 €	400 €	300 €	2.300 €	14,3	0	0 €	0 €	0 €	Compra	0 €	5
Opel	eCombo	Eléctrico	Stor	7	130.000 €	1.300 €	2.700 €	125 €	0 €	3.000 €	0	44	0 €	0 €	0 €	Compra	5.600 €	5

Una gran diferencia de las dos flotas es el periodo de amortización de los vehículos. Por un lado, España amortiza sus automóviles a 7 años debido a que son vehículos especiales del sector y que tienen una gran durabilidad. Por otro lado, Suecia amortiza los vehículos a 5 años puesto que son vehículos de menor tamaño y sin ningún tipo de blindaje.

4.3.1.1 Parámetros

Los parámetros del estudio se mantienen constantes respecto al caso base de Madrid puesto que están dentro de la misma compañía y tienen la misma tasa de reemplazo, objetivos de reducción, etc.

Tabla 70: Simulación Escalabilidad: Parámetros

Coefficiente para Km	0,5
Coefficiente para Edad	0,5
Tasa Reemplazo Compra	10,00%
Años Estimación	9
Año Actual	2021
Precio Electricidad (€/kWh)	0,12
Precio Diésel (€/litro)	0,85
Emisiones CO2 (kg/litro)	2,65
Precio Emisiones (€/ton CO2)	82
Cambio en el IPC	1,4%
Impuestos	21%

Tasa de Retorno	7%
Objetivo Reducción Emisiones CO2	50%
Modo de simulación	Reducción necesariamente mayor al objetivo

4.3.1.2 Estudio económico

Una vez terminada la simulación, se procede a analizar los resultados de este caso de estudio. La siguiente tabla muestra el NPV de cada vehículo del mercado en cada año del estudio en el que puede ser comprado. El orden de los vehículos es el mismo que el de la tabla con la información de los vehículos del mercado, siendo los índices impares automóviles diésel y los pares eléctricos. Los 20 primeros vehículos del mercado son los candidatos a incorporarse a la flota de Madrid y los 14 restantes a la flota de Estocolmo, debido a sus diferentes de tamaño y tipo de ruta.

Como se ha explicado en la metodología, el precio de adquisición del vehículo eléctrico disminuye año tras año y, consecuentemente, el NPV del vehículo. Por otro lado, el precio de adquisición del vehículo diésel no varía puesto que se supone una tecnología madura.

En la tabla se observa el punto en que cada categoría alcanza la paridad. Este punto se consigue cuando los NPV del vehículo diésel y eléctrico son iguales. En este estudio la paridad de las categorías se alcanza en momentos diferentes, en los vehículos de un tamaño pequeño se alcanza antes mientras que en los de tamaño mayor se alcanza después debido a que requieren de unas mayores prestaciones y la tecnología necesaria tardará más tiempo en desarrollarse, al igual que la disminución de los precios.

Tabla 71: Simulación Escalabilidad: NPV de los vehículos del mercado

Año Estudio / Vehículo Mercado	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
1	111.355 €	111.355 €	111.355 €	111.355 €	111.355 €	111.355 €	111.355 €	111.355 €	111.355 €
2	114.419 €	111.430 €	109.353 €	107.145 €	105.117 €	103.243 €	101.505 €	99.889 €	98.379 €
3	42.092 €	42.092 €	42.092 €	42.092 €	42.092 €	42.092 €	42.092 €	42.092 €	42.092 €
4	34.463 €	33.799 €	33.197 €	32.645 €	32.138 €	31.669 €	31.235 €	30.831 €	30.453 €
5	177.605 €	177.605 €	177.605 €	177.605 €	177.605 €	177.605 €	177.605 €	177.605 €	177.605 €
6	210.759 €	203.299 €	199.069 €	195.194 €	191.637 €	188.348 €	185.299 €	182.461 €	179.812 €
7	111.355 €	111.355 €	111.355 €	111.355 €	111.355 €	111.355 €	111.355 €	111.355 €	111.355 €
8	114.419 €	111.430 €	109.353 €	107.145 €	105.117 €	103.243 €	101.505 €	99.889 €	98.379 €
9	42.092 €	42.092 €	42.092 €	42.092 €	42.092 €	42.092 €	42.092 €	42.092 €	42.092 €
10	34.463 €	33.799 €	33.197 €	32.645 €	32.138 €	31.669 €	31.235 €	30.831 €	30.453 €
11	177.605 €	177.605 €	177.605 €	177.605 €	177.605 €	177.605 €	177.605 €	177.605 €	177.605 €
12	210.759 €	203.299 €	199.069 €	195.194 €	191.637 €	188.348 €	185.299 €	182.461 €	179.812 €
13	111.355 €	111.355 €	111.355 €	111.355 €	111.355 €	111.355 €	111.355 €	111.355 €	111.355 €
14	114.419 €	111.430 €	109.353 €	107.145 €	105.117 €	103.243 €	101.505 €	99.889 €	98.379 €
15	42.092 €	42.092 €	42.092 €	42.092 €	42.092 €	42.092 €	42.092 €	42.092 €	42.092 €
16	34.463 €	33.799 €	33.197 €	32.645 €	32.138 €	31.669 €	31.235 €	30.831 €	30.453 €
17	177.605 €	177.605 €	177.605 €	177.605 €	177.605 €	177.605 €	177.605 €	177.605 €	177.605 €
18	210.759 €	203.299 €	199.069 €	195.194 €	191.637 €	188.348 €	185.299 €	182.461 €	179.812 €
19	81.413 €	81.413 €	81.413 €	81.413 €	81.413 €	81.413 €	81.413 €	81.413 €	81.413 €
20	90.316 €	85.153 €	84.188 €	83.304 €	82.493 €	81.742 €	80.733 €	79.534 €	78.413 €
21	77.133 €	77.133 €	77.133 €	77.133 €	77.133 €	77.133 €	77.133 €	77.133 €	77.133 €
22	85.832 €	80.748 €	79.855 €	79.037 €	78.286 €	77.591 €	76.782 €	75.648 €	74.590 €
23	85.038 €	85.038 €	85.038 €	85.038 €	85.038 €	85.038 €	85.038 €	85.038 €	85.038 €
24	96.166 €	90.711 €	89.481 €	88.354 €	87.319 €	86.363 €	85.476 €	84.425 €	83.205 €
25	85.038 €	85.038 €	85.038 €	85.038 €	85.038 €	85.038 €	85.038 €	85.038 €	85.038 €
26	96.166 €	90.711 €	89.481 €	88.354 €	87.319 €	86.363 €	85.476 €	84.425 €	83.205 €
27	118.428 €	118.428 €	118.428 €	118.428 €	118.428 €	118.428 €	118.428 €	118.428 €	118.428 €
28	130.995 €	123.756 €	122.269 €	120.906 €	119.655 €	118.498 €	116.621 €	114.821 €	113.140 €
29	125.341 €	125.341 €	125.341 €	125.341 €	125.341 €	125.341 €	125.341 €	125.341 €	125.341 €
30	139.780 €	132.236 €	130.472 €	128.856 €	127.372 €	126.001 €	124.341 €	122.408 €	120.602 €
31	104.269 €	104.269 €	104.269 €	104.269 €	104.269 €	104.269 €	104.269 €	104.269 €	104.269 €
32	126.695 €	118.959 €	117.021 €	115.245 €	113.615 €	112.107 €	110.710 €	109.409 €	108.195 €
33	104.269 €	104.269 €	104.269 €	104.269 €	104.269 €	104.269 €	104.269 €	104.269 €	104.269 €
34	126.695 €	118.959 €	117.021 €	115.245 €	113.615 €	112.107 €	110.710 €	109.409 €	108.195 €

La siguiente tabla muestra los vehículos a retirar de la flota y los que hay que incorporar en cada año del estudio. Al tener un 10% de tasa de reemplazo y una flota total de 90 vehículos, cada año del estudio se han de cambiar 9 vehículos, lo que hace que a lo largo del estudio se hayan incorporado 81 vehículos nuevos.

Entre los vehículos a retirar se encuentran vehículos de la flota de Madrid y de Estocolmo. El primer año solo se reemplazan vehículos de la primera flota puesto que son más antiguos y con más kilómetros. En los siguientes años se observa como la cantidad de vehículos reemplazados en cada flota es similar al porcentaje de la flota total que representan. En el año 2028 se alcanza el mayor número de vehículos de Estocolmo reemplazados en un año con 4 vehículos.

Como se explicará en el análisis medioambiental, la solución óptima de la simulación es la que tiene el NPV total mínimo. Por tanto, se incorporarán los vehículos más económicos a cada flota según el año del estudio. Esto supone que, si no hubiera ninguna restricción de emisiones, la reducción total de ellas es superior al 50%.

La incorporación de vehículos a la flota es variada. Se puede observar que en los primeros años hay vehículos que se incorporan a la flota de Madrid que son eléctricos. Esto sucede porque son de tamaño pequeño y han alcanzado la paridad desde el principio del estudio, por lo que será más económico incorporarlos en lugar de los vehículos diésel. Sin embargo, otros vehículos incorporados a la flota de Madrid son automóviles diésel debido a que la paridad de los coches medianos llega más adelante (2024) y la de los vehículos grandes no se alcanza en el estudio.

Por otro lado, la incorporación de vehículos a la flota de Estocolmo es totalmente diferente. Debido a la gran diferencia entre los precios de los vehículos eléctricos y diésel, la paridad de las tecnologías no se alcanza hasta los últimos años del estudio. Es por ello que no se incorpora ningún vehículo eléctrico en Estocolmo hasta el año 2028 cuando se alcanza la paridad de los vehículos.

Replicabilidad y Escalabilidad a otros sectores y entornos

Tabla 72: Simulación Escalabilidad: Vehículos a retirar e incorporar en cada año del estudio

Año	Identificador	Tamaño	Ruta	Identificador	Marca	Modelo	Tipo	NPV
2022	760	Pequeño	3	31	Renault	e-Jumpy	Eléctrico	- 34.463 €
	772	Pequeño	2	32	Seat	e-Jumpy	Eléctrico	- 34.463 €
	784	Pequeño	3	33	Renault	e-Jumpy	Eléctrico	- 34.463 €
	785	Pequeño	3	34	Renault	e-Jumpy	Eléctrico	- 34.463 €
	799	Grande	3	35	Volta	TGM	Diesel	- 177.605 €
	809	Mediano	1	36	Iveco	Daily	Diesel	- 111.355 €
	852	Grande	3	37	Volta	TGM	Diesel	- 177.605 €
	893	Pequeño	2	38	Seat	e-Jumpy	Eléctrico	- 34.463 €
	927	Pequeño	3	39	Renault	e-Jumpy	Eléctrico	- 34.463 €
2023	781	Pequeño	1	40	Citroen	e-Jumpy	Eléctrico	- 33.799 €
	793	Pequeño	1	41	Citroen	e-Jumpy	Eléctrico	- 33.799 €
	811	Mediano	2	42	VW	Daily	Diesel	- 111.355 €
	856	Mediano	1	43	Iveco	Daily	Diesel	- 111.355 €
	882	Mediano	1	44	Iveco	Daily	Diesel	- 111.355 €
	884	Mediano	3	45	Nissan	Daily	Diesel	- 111.355 €
	900	Mediano	3	46	Nissan	Daily	Diesel	- 111.355 €
	1	Liten	4	47	Nissan	NCV	Diesel	- 81.413 €
	15	Stor	7	48	Opel	Combo	Diesel	- 104.269 €
2024	822	Grande	1	49	MAN	TGM	Diesel	- 177.605 €
	849	Grande	2	50	Tesla	TGM	Diesel	- 177.605 €
	929	Pequeño	2	51	Seat	e-Jumpy	Eléctrico	- 33.197 €
	964	Mediano	2	52	VW	E-Daily	Eléctrico	- 109.353 €
	1010	Mediano	2	53	VW	E-Daily	Eléctrico	- 109.353 €
	1011	Mediano	3	54	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 109.353 €
	14	Stor	6	55	Opel	Combo	Diesel	- 104.269 €
	16	Stor	6	56	Opel	Combo	Diesel	- 104.269 €
	18	Stor	7	57	Opel	Combo	Diesel	- 104.269 €
2025	1015	Mediano	3	58	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 107.145 €
	1017	Mediano	3	59	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 107.145 €
	1503	Mediano	1	60	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 107.145 €
	1518	Mediano	2	61	VW	E-Daily	Eléctrico	- 107.145 €
	1537	Mediano	2	62	VW	E-Daily	Eléctrico	- 107.145 €
	1539	Mediano	1	63	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 107.145 €
	2	Liten	6	64	Mercedes	Vito	Diesel	- 85.038 €
	17	Stor	4	65	Ford	Transit	Diesel	- 118.428 €
	19	Stor	4	66	Ford	Transit	Diesel	- 118.428 €
2026	775	Grande	3	67	Volta	TGM	Diesel	- 177.605 €
	1517	Mediano	1	68	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 105.117 €
	1523	Mediano	3	69	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 105.117 €
	1536	Mediano	3	70	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 105.117 €
	1613	Mediano	1	71	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 105.117 €
	3	Liten	4	72	Nissan	NCV	Diesel	- 81.413 €
	4	Liten	6	73	Mercedes	Vito	Diesel	- 85.038 €
	5	Liten	6	74	Mercedes	Vito	Diesel	- 85.038 €
	20	Stor	6	75	Opel	Combo	Diesel	- 104.269 €
2027	1019	Pequeño	1	76	Citroen	e-Jumpy	Eléctrico	- 31.669 €
	1614	Mediano	3	77	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 103.243 €
	1623	Mediano	2	78	VW	E-Daily	Eléctrico	- 103.243 €
	1703	Mediano	1	79	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 103.243 €
	1721	Mediano	1	80	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 103.243 €
	1734	Pequeño	3	81	Renault	e-Jumpy	Eléctrico	- 31.669 €
	6	Liten	5	82	Renault	Kangoo	Diesel	- 77.133 €
	21	Stor	4	83	Ford	Transit	Diesel	- 118.428 €
	22	Stor	6	84	Opel	Combo	Diesel	- 104.269 €
2028	1709	Mediano	3	85	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 101.505 €
	1717	Mediano	2	86	VW	E-Daily	Eléctrico	- 101.505 €
	1724	Mediano	2	87	VW	E-Daily	Eléctrico	- 101.505 €
	7	Liten	6	88	Mercedes	Vito	Diesel	- 85.038 €
	8	Liten	7	89	Mercedes	Vito	Diesel	- 85.038 €
	23	Stor	4	90	Ford	eTransit	Eléctrico	- 116.621 €
	24	Stor	5	91	Dacia	eDokker	Eléctrico	- 124.341 €
	25	Stor	6	92	Opel	Combo	Diesel	- 104.269 €
	26	Stor	5	93	Dacia	eDokker	Eléctrico	- 124.341 €
2029	1533	Mediano	1	94	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 99.889 €
	1635	Mediano	1	95	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 99.889 €
	1733	Pequeño	2	96	Seat	e-Jumpy	Eléctrico	- 30.831 €
	1805	Mediano	3	97	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 99.889 €
	1815	Mediano	3	98	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 99.889 €
	1816	Mediano	3	99	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 99.889 €
	9	Liten	4	100	Nissan	eNCV	Eléctrico	- 79.534 €
	10	Liten	7	101	Mercedes	eVito	Eléctrico	- 84.425 €
	12	Liten	5	102	Renault	eKangoo	Eléctrico	- 75.648 €
2030	1731	Mediano	2	103	VW	E-Daily	Eléctrico	- 98.379 €
	1809	Mediano	3	104	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 98.379 €
	1810	Mediano	1	105	Iveco	E-Daily	Eléctrico	- 98.379 €
	1817	Mediano	3	106	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 98.379 €
	1932	Mediano	3	107	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 98.379 €
	1950	Mediano	3	108	Nissan	E-Daily	Eléctrico	- 98.379 €
	11	Liten	6	109	Mercedes	eVito	Eléctrico	- 83.205 €
	27	Stor	4	110	Ford	eTransit	Eléctrico	- 113.140 €
	29	Stor	6	111	Opel	Combo	Diesel	- 104.269 €

La siguiente tabla es un resumen anual del estudio económico del caso base. En ella se muestra lo que la empresa debe invertir en NPV cada año del estudio, así como la distribución del coste total en cada uno de los años. Cabe destacar que el NPV a gastar cada año varía entre un 9% y un 12% del total. Esto es muy bueno para la empresa ya que tendrá una partida de presupuestos relativamente constante a lo largo de los 9 años del estudio, variando entre los 673.343,90€ y los 1.029.271,64€. La empresa podrá cumplir con la reducción de emisiones deseada teniendo un plan constante de recambio de la flota y sin tener sobresaltos de gasto entre un año y otro, haciendo que se descontrola el cash flow disponible de la compañía.

Tabla 73: Simulación Escalabilidad: Resumen de los resultados del estudio económico

Año	NPV Año	NPV Acumulado	% NPV	% NPV Acumulado
2022	- 673.344 €	- 673.344 €	9%	9%
2023	- 810.056 €	- 1.483.400 €	10%	19%
2024	- 1.029.272 €	- 2.512.671 €	13%	32%
2025	- 964.761 €	- 3.477.433 €	12%	45%
2026	- 953.834 €	- 4.431.267 €	12%	57%
2027	- 776.142 €	- 5.207.408 €	10%	67%
2028	- 944.164 €	- 6.151.573 €	12%	79%
2029	- 769.881 €	- 6.921.453 €	10%	89%
2030	- 890.886 €	- 7.812.339 €	11%	100%

El NPV total del estudio son 7.812.339,06 € que, sin ser la solución más económica para la empresa, logra obtener la reducción de emisiones de CO₂ requerida por la empresa y la Unión Europea en ambos países.

4.3.1.3 Estudio medioambiental

Tras haber analizado el estudio económico de la simulación, se procederá en este apartado con el estudio medioambiental. Como se ha podido comprobar en el apartado anterior, esta variación en el objetivo se ve reflejada en la incorporación de varios vehículos en la flota, elegidos por su menor NPV y no por sus bajas emisiones.

Tal y como se explicó en la metodología, la optimización del estudio trata de la iteración de un precio sombra (λ) relativo a las emisiones de CO₂ producidas por cada uno de los vehículos candidatos a entrar en la flota. Un valor más bajo de λ indica que se le da menos valor a las emisiones y si se le da un valor mayor quiere decir que se le da mayor importancia a las emisiones.

La primera iteración de la optimización utiliza un valor λ igual a cero, lo que significa que solo se tiene en cuenta el NPV del vehículo para su elección y no sus emisiones. Si la reducción de emisiones de la primera iteración es mayor a la deseada por el usuario, la optimización se da por concluida, puesto que no puede haber una combinación con menor NPV que esta. Como se puede observar en las siguientes gráficas, solo está representado un punto en ellas. Esto quiere decir que el proceso de optimización solo ha realizado la primera iteración. El resultado que se obtiene es una reducción total de emisiones en los 9 años del estudio del 61,97%, siendo superior a la deseada por el usuario (50%).

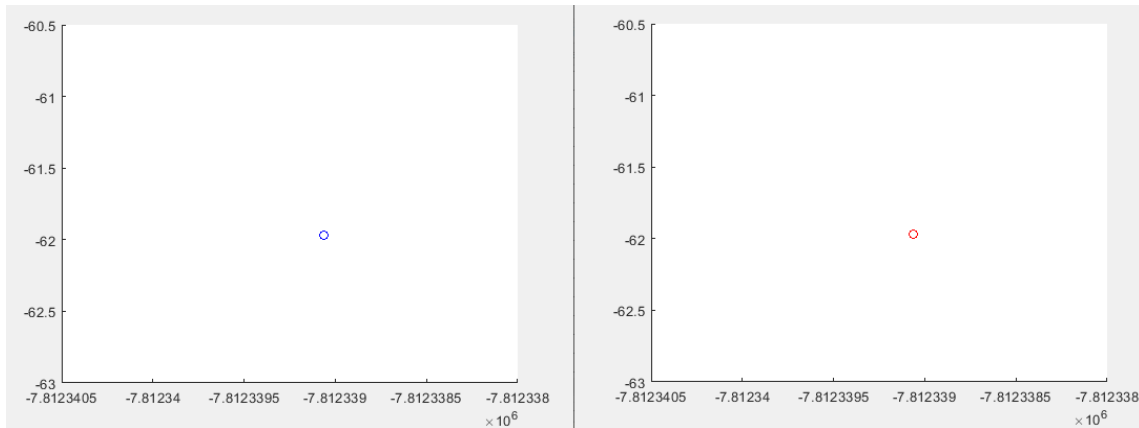


Figura 26: Simulación Escalabilidad: Gráfico de dispersión de las soluciones

La siguiente tabla muestra las emisiones de la flota en cada año del estudio y el tanto por ciento de reducción que se consigue con las nuevas incorporaciones. Cabe destacar que, durante los 5 primeros años se reduce la mitad del total del estudio, mientras que en los 4 últimos años se consigue disminuir la otra mitad del total de las emisiones reducidas. Por tanto, la reducción de emisiones es constante durante los años del estudio, lo que facilitará el logro del objetivo y el cumplimiento de restricciones durante el estudio.

Tabla 74: Simulación Escalabilidad: Resumen de los resultados del estudio medioambiental

Año	Emisiones Año	% Reducción Emisiones
2021	1753341	0,00%
2022	1598293	8,84%
2023	1542796	12,01%
2024	1461848	16,63%
2025	1332093	24,03%
2026	1240243	29,26%
2027	1111304	36,62%
2028	981939	44,00%
2029	826987	52,83%
2030	666778	61,97%

La simulación termina con una reducción total de emisiones en 9 años de estudio del -61,97% superando la reducción requerida en los parámetros del estudio (50%). Las flotas de vehículos de la empresa Loomis en Madrid y Estocolmo podrán cumplir con las restricciones de emisiones incorporando los vehículos más económicos cada año, por lo que no tendrán que hacer ningún gasto adicional en el reemplazo de vehículos.

4.4 Conclusiones

El objetivo del proyecto es ayudar a las empresas a conseguir sus objetivos de reducción de emisiones. Por ello, el alcance del uso de la herramienta es global, ya que el problema y el usuario también lo son. Debido a esto, dos de los aspectos fundamentales del proyecto son la replicabilidad y escalabilidad. Estas cualidades confieren a la herramienta de una universalidad necesaria para conseguir lograr el fin del trabajo.

En primer lugar, la replicabilidad del proyecto permite que cualquier empresa pueda hacer uso de la herramienta dando igual en qué sector se encuentre, cómo sea su flota de vehículos o desde que país opera. La herramienta consta de la flexibilidad suficiente para que la empresa pueda categorizar su flota según le convenga y parametrizar el estudio con toda la información de la compañía y su entorno.

Para ejemplificar la flexibilidad de la herramienta para la adaptación a distintos tipos de compañías, flotas y países, se ha realizado una simulación. Este estudio se realiza para una empresa de reparto de comida a domicilio en la ciudad brasileña de Río de Janeiro. La flota de la empresa se compone de 30 vehículos entre motocicletas y turismos, los cuales realizan 5 rutas diferentes por la ciudad. Tras realizar la simulación, los resultados que se obtienen son que la empresa debe de gastar un NPV total de 540.669,56 € para lograr la reducción de emisiones del 30% que les impone el gobierno de la ciudad para 2033.

Por otro lado, la escalabilidad también está presente dentro el proyecto. Este aspecto es fundamental en el software puesto que permite trabajar con distintos volúmenes de flotas o incluso con flotas distintas a la vez si es el caso de una empresa multinacional. El objetivo es no perder cualidades de la herramienta sea el tipo de flota que sea.

La herramienta debe de ser fácil de usar y de manejar. Por ello, el usuario se comunica con la herramienta a través de un Excel donde deberá de introducir todos los datos necesarios para la simulación. También recibirá los resultados en un fichero Excel que es más fácil de manejar. De esta forma, el usuario no deberá acceder al código informático que no tiene por qué saber manejar. Además, gracias al programa ejecutable, el usuario no tendrá que saber utilizar Matlab ni tampoco tener instalada la licencia.

Para estudiar la escalabilidad de la herramienta, se ha propuesto un caso de estudio. En él, se analiza la flota de Madrid y de Estocolmo de Loomis. Las dos flotas son totalmente distintas entre sí pero que forman parte de la misma compañía, compartiendo objetivos de reducción de emisiones. A través de este estudio se pretende demostrar que la herramienta puede ser utilizada por empresas más o menos grandes y por multinacionales operando en varios países. Tras realizar la simulación, los resultados que se obtienen son que la empresa debe de gastar un NPV total de 7.812.339,06 € para lograr la reducción de emisiones del 50% que les impone el gobierno de la ciudad para 2030.

5 Conclusiones y futuros desarrollos

5.1.1 Conclusiones del proyecto

La contaminación medioambiental a la que hacemos frente en la actualidad es uno de los mayores problemas que tiene el mundo actualmente. La gran cantidad de partículas contaminantes emitidas a la atmósfera hacen que nos situemos en niveles críticos para la salud de la población y la del planeta.

Con acuerdos internacionales, los gobiernos pretenden reducir drásticamente la emisión de partículas contaminantes. A través de restricciones, impuestos y limitaciones, se fomentan aquellas tecnologías que hacen reducir las emisiones de partículas contaminantes. Uno de los sectores que más emisiones produce es el transporte, causante del 16,2% de ellas.

Como es de suponer, las zonas donde se emiten más partículas contaminantes son los núcleos urbanos. Las ciudades no han dejado de crecer en el último siglo, concentrando la mayor parte de industrias, servicios y población en un área reducida. Debido a esta alta densidad, las ciudades producen alrededor del 75% de las emisiones anuales a la atmósfera, por lo que la mayoría de las restricciones afectan a los núcleos urbanos.

El objetivo del 2030, según el acuerdo de París, obliga a las empresas a reducir sus emisiones de CO₂ un 55% respecto a las que generaban en 1990. Debido a la urgencia de este cambio en las flotas y la etapa en la que se encuentran las nuevas tecnologías, las empresas de transporte se ven envueltas en una situación de incertidumbre a la que deberán enfrentarse en los próximos años.

La finalidad de este trabajo es guiar a las empresas en el camino a la electrificación de la flota para que cumplan con los objetivos de reducción de emisiones marcados por el gobierno o la propia empresa. Para ello, se optimiza el reemplazo de vehículos para minimizar el NPV total a lo largo de los años siempre y cuando se logre el objetivo de reducción de emisiones requerido.

La metodología del proyecto se basa en tres áreas: análisis económico de los vehículos del mercado, elección de los vehículos a retirar de la flota y optimización de los vehículos a incorporar.

El análisis económico de los vehículos del mercado se realiza basado en un flujo de caja, calculando el “cost of ownership” de cada vehículo que será candidato a incorporarse a la flota. Con el fin de predecir el comportamiento de distintos costes asociados a la adquisición de vehículos, se ha desarrollado una metodología en dos de los aspectos más influyentes en el precio:

- Evolución del precio de los vehículos eléctricos: considerando la evolución del precio de la batería de litio, componente que acapara el 35% del precio total.
- Evolución de los subsidios o incentivos por parte de los gobiernos al adquirir un vehículo eléctrico: obteniendo el porcentaje que cubre el subsidio respecto a la diferencia entre el NPV de los vehículos diésel y eléctricos el primer año. Para los años posteriores, ese porcentaje se mantendrá constante, pudiendo calcular el

subsidio anual según la diferencia entre el NPV de los vehículos diésel y eléctricos cada año. Una vez se alcance la paridad de las tecnologías, los subsidios serán 0.

La elección de renovación de la flota se realiza de diferente forma según sea un vehículo en alquiler o en propiedad. Para el primero, la decisión de que un vehículo alquilado sea reemplazado es que su contrato de alquiler haya concluido. Para los vehículos en propiedad, se halla un coeficiente en base a su edad y kilómetros acumulados. Según la tasa de reemplazo introducida por el usuario, se elegirán para retirar el número de vehículos con mayor coeficiente.

Por último, una vez se sabe qué vehículos se han de retirar y cuáles son las características de los vehículos en el mercado, se procede a la optimización. El objetivo es minimizar el valor absoluto del NPV total del estudio siempre y cuando la reducción de emisiones al final del estudio sea mayor que la requerida por el usuario. Utilizando un precio sombra para las emisiones de los vehículos a incorporar, se realiza una iteración para conseguir la combinación óptima que dé como resultado el menor NPV y la reducción de emisiones requerida.

Se ha desarrollado una herramienta con el fin de que este proyecto sea práctico para distintas empresas. A través del programa informático Matlab, se ha escrito un código en lenguaje M para realizar casos de estudio. Con el fin facilitar el uso al usuario, los datos necesarios serán introducidos completando un Excel. Por otro lado, una vez el programa termine la simulación, los resultados serán escritos en otro fichero Excel para el posterior análisis del usuario. Para finalizar, se ha creado un ejecutable que permite utilizar la herramienta sin necesidad de tener instalado Matlab, lo que permite su uso sin necesidad de tener instalada la licencia del programa.

Para mostrar y entender el funcionamiento de la herramienta se han realizado hasta 7 simulaciones para analizar cómo debería de ser reemplazada la flota de vehículos de Loomis. La empresa es una compañía sueca distribuida por todo el mundo que se dedica al transporte del dinero en efectivo. La flota elegida pertenece a la base de Madrid y consta de 60 vehículos con diferentes configuraciones de tamaño y tipo de ruta asignado.

El caso base tiene una tasa de reemplazo del 10% y un objetivo de reducción de emisiones del 50% a conseguir en 9 años de estudio. Por tanto, durante la simulación se tendrán que retirar e incorporar 6 vehículos al año, es decir, un total de 54 automóviles a lo largo del estudio. Los detalles de los resultados se pueden observar dentro del apartado donde se analizan detalladamente. La solución óptima del estudio cuenta con un 54,12% de reducción de emisiones en 9 años donde la empresa tiene que gastar un NPV total de 4.825.394,43 €.

El resto de simulaciones del capítulo pretenden recrear distintos escenarios que pueden ocurrir en un futuro próximo. En cada una de ellas se varía un parámetro para analizar cómo afecta en la simulación y en la solución óptima del estudio. Las simulaciones realizadas han sido las siguientes:

2. Disminución de la reducción de emisiones del 50% al 30%: en este escenario la empresa tiene que alcanzar una reducción menor de emisiones en el mismo tiempo, por lo que necesitará emplear menos dinero para conseguir el objetivo. La

solución óptima tiene un NPV total de 4.822.678,74 € obteniendo un 47,52% de reducción de emisiones.

3. Subida del precio del diésel un 40%: al haber aumentado el precio del combustible, se incorporarán más vehículos eléctricos que son más caros que los automóviles diésel pero producen menos emisiones de CO₂. Por tanto, la solución obtenida tiene un NPV total mayor que el caso base (4.963.819,26 €) con una reducción muy alta de emisiones del 77,21%.
4. La duración del estudio se reduce de 9 años a 6 años: al reducirse el tiempo disponible para reducir el 50% de las emisiones, la empresa deberá gastar más dinero proporcionalmente en los 6 años aunque el NPV total sea menor al reemplazar solo 6x6=36 vehículos. La solución óptima tiene una reducción total de emisiones del 53,38% y un NPV total de 3.292.747,76 €.
5. Subida del precio de la electricidad un 67%: al aumentar el precio de la electricidad, habrá que emplear más dinero en los vehículos eléctricos que se incorporen. Por ello, la solución óptima tiene la misma combinación de vehículos nuevos obteniendo la misma reducción de emisiones (54,12%) pero con un NPV total de 4.947.704,88 €, mayor que el caso base.
6. Reducción de la tasa de reemplazo del 5% al 10%: en este escenario la empresa solo retira 3 vehículos de la flota cada año, por lo que solo recambia 27 vehículos a lo largo del estudio, siendo imposible llegar a un 50% de reducción de emisiones. Por ello, la herramienta aumenta la tasa de reemplazo al 6,66% (4 vehículos) para obtener una solución que cumpla con los objetivos de emisiones. El NPV total es de 3.220.142,33 € y una reducción total de emisiones del 51,73%.
7. Retiro de los subsidios por parte del estado: al retirar los subsidios, el NPV de los vehículos eléctricos aumentarán, haciendo que el NPV total de la simulación aumente. La solución óptima tiene la misma combinación de vehículos incorporados a la flota por lo que tiene la misma reducción de emisiones que el caso base (54,12%) pero un NPV ligeramente mayor de 4.826.088,15 €.

Tabla 75: Resumen de los resultados de las simulaciones

Nº Simulación	Estudio	Reducción de Emisiones	NPV Total
1	Caso Base	54,12%	4.825.394,43 €
2	Reducción de Emisiones al 30%	47,52%	4.822.678,74 €
3	Subida de precio del diesel del 40%	77,21%	4.963.819,26 €
4	Duración del estudio reducida a 6 años	53,38%	3.292.747,76 €
5	Subida de precio de la electricidad del 67%	54,12%	4.947.704,88 €
6	Reducción de la tasa de reemplazo al 5%	51,73%	3.220.142,33 €
7	Retiro de los subsidios	54,12%	4.826.088,15 €

El alcance del uso de la herramienta es global, ya que el problema y el usuario también lo son. Debido a esto, dos de los aspectos fundamentales del proyecto son la replicabilidad y escalabilidad. Estas cualidades confieren a la herramienta de una universalidad necesaria para conseguir lograr el fin del trabajo.

En primer lugar, la replicabilidad del proyecto permite que cualquier empresa pueda hacer uso de la herramienta dando igual en qué sector se encuentre, cómo sea su flota de vehículos o desde que país opera. La herramienta consta de la flexibilidad suficiente para

que la empresa pueda categorizar su flota según le convenga y parametrizar el estudio con toda la información de la compañía y su entorno.

Para ejemplificar la flexibilidad de la herramienta para la adaptación a distintos tipos de empresas, flotas y países, se ha realizado una simulación. Este estudio se realiza para una empresa de reparto de comida a domicilio en la ciudad brasileña de Río de Janeiro. La flota de la empresa se compone de 30 vehículos entre motocicletas y turismos, los cuales realizan 5 rutas diferentes por la ciudad. Tras realizar la simulación, los resultados que se obtienen son que la empresa debe de gastar un NPV total de 540.669,56 € para lograr la reducción de emisiones del 30% que les impone el gobierno de la ciudad para 2033.

Además, gracias al programa ejecutable, el usuario no tendrá que saber utilizar Matlab ni tampoco tener instalada la licencia. Esto permite a cualquier empleado de la empresa utilizarlo ya que en ningún momento está en contacto con el código y solo se comunica con la herramienta a través de Excel, software conocido por la mayoría de trabajadores.

Por otro lado, la escalabilidad también está presente dentro el proyecto. Este aspecto es fundamental en el software puesto que permite trabajar con distintos volúmenes de flotas o incluso con flotas distintas a la vez si es el caso de una empresa multinacional. El objetivo es no perder cualidades de la herramienta sea el tipo de flota que sea.

Para estudiar la escalabilidad de la herramienta, se ha propuesto un caso de estudio. En él, se analiza la flota de Madrid y de Estocolmo de Loomis. Las dos flotas son totalmente distintas entre sí pero que forman parte de la misma compañía, compartiendo objetivos de reducción de emisiones. A través de este estudio se pretende demostrar que la herramienta puede ser utilizada por empresas más o menos grandes y por multinacionales operando en varios países. Tras realizar la simulación, los resultados que se obtienen son que la empresa debe de gastar un NPV total de 7.812.339,06 € para lograr la reducción de emisiones del 50% que les impone el gobierno de la ciudad para 2030.

5.1.2 Impacto del estudio en los ODS

El desarrollo sostenible se define como el desarrollo capaz de satisfacer las necesidades de la generación presente sin poner en riesgo las capacidades de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades. Esto exige a la sociedad un esfuerzo adicional en construir un futuro inclusivo, sostenible y resiliente tanto con las personas como con el planeta.

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible se aprobaron en el año 2015 por la Organización de las Naciones Unidas. La agenda 2030 sobre desarrollo sostenible tiene como fin que los países y sociedades emprendan un nuevo camino para mejorar la vida de todos los seres humanos, sin dejar a nadie atrás. Aunque todos los Estados Miembros de la ONU aprobaron los Objetivos de Desarrollo Sostenible como parte de la agenda 2030, las medidas no avanzan a la velocidad ni a la escala necesarias para alcanzarlos. Las áreas más importantes de estos objetivos son las siguientes:

- Pobreza (crecimiento económico): el número de personas que viven en situación de extrema pobreza ha disminuido del 36% en 1990 al 10% en 2015. Debido a la pandemia del COVID-19, este número subirá un 8% siendo el primer año desde hace 30 que la cifra aumenta. Estas personas no pueden satisfacer sus necesidades básicas, en algunos casos ni teniendo un puesto de trabajo.
- Empoderar a todas las mujeres (inclusión social): aunque se han conseguido avances en las últimas décadas en este asunto, todavía hay niñas obligadas a casarse en un matrimonio precoz, pocas mujeres en altos cargos y mujeres que sufren violencia sexual o física a manos de hombres o sus propias parejas.
- Emergencia climática (protección del medio ambiente): el cambio climático supone uno de los mayores problemas para el desarrollo del planeta y de la sociedad. Esto supone que las iniciativas destinadas a erradicar la pobreza y bienestar de las personas están relacionadas con el cambio climático. Los niveles de CO₂ aumentan cada año así como el aumento de la temperatura y del nivel del agua debido al deshielo de los polos.

La siguiente tabla muestra los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible definidos por la ONU:



Ilustración 13: Objetivos de Desarrollo Sostenible

Para poder alcanzar los objetivos será necesario realizar una inversión en todos los sectores de entre cinco y siete billones de dólares. Actualmente se cuenta con una financiación entorno a los 200 billones de dólares, cantidad que no es suficiente para poder conseguir los objetivos propuestos. No solo son gastos financiar los ODS ya que se estima que alcanzarlos supondría crear 12 billones de dólares en oportunidades de mercado en torno a 380 millones de nuevos puestos de trabajo para el final de la agenda 2030.

Como se ha explicado a lo largo del proyecto, este trabajo guía a las empresas a reducir su emisión de partículas contaminantes a la atmósfera. Con esto se pretende mitigar el cambio climático y las consecuencias que genera en la sociedad y el planeta. El cambio climático afecta a la salud de las personas, seguridad alimenticia e hídrica y a otros factores. Los logros alcanzados en materia de desarrollo podrían verse reducidos si no se consigue mitigar el cambio climático. Por ello, la contaminación medioambiental se considera una de las tres áreas fundamentales de estos objetivos.

Cabe destacar que el desarrollo sostenible y el cambio climático son dos conceptos que van unidos en ambas direcciones. Por un lado, el desarrollo sostenible no se podrá lograr si no se adoptan medidas contra el cambio climático. Por otro lado, muchos de los objetivos de desarrollo sostenible se centran en factores que son los desencadenantes del cambio climático en la sociedad como se verá más adelante.

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible en los que impacta el proyecto se pueden dividir en dos categorías: impacto directo e indirecto. Los ODS directos son los que reciben un resultado positivo de la aplicación del proyecto de manera directa, sin ser consecuencia de otro ODS. Los ODS indirectos son los que reciben el impacto del proyecto a través de un Objetivo de Desarrollo Sostenible directo. Los ODS que tiene como objetivo el trabajo por orden de relevancia son los siguientes:

5.1.2.1 ODS 13: Acción por el clima

El objetivo de desarrollo sostenible consiste en adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos. La década pasada fue la más calurosa que se ha registrado jamás en la historia, siendo el año 2019 el segundo año más caluroso que ha habido nunca.

Los datos proporcionados por Naciones Unidas son alarmantes: la temperatura media ha aumentado 0,85°C entre 1880 y 2012, reduciendo la cantidad de cereales producidos en un 5%, lo que significa 40 megatonnes anuales a nivel mundial. La OMS prevé un incremento de la temperatura de 1,5°C al final del siglo.

Por otro lado, los océanos se están calentando, provocando el deshielo de los polos y el aumento del nivel del mar en 19 cm entre 1901 y 2010, produciendo una pérdida de hielo de 1,07 millones de km² cada década. Las Naciones Unidas prevén una elevación de entre 40 y 63 cm para 2100 que afectaría a gran parte de las ciudades ubicadas en la costa.

Por otro lado, la contaminación ambiental se sitúa entre las mayores preocupaciones de la sociedad debido a los niveles de CO₂ emitidos anualmente a la atmósfera. Desde 1990 se ha aumentado un 50% las emisiones de dióxido de carbono. Cada año estos niveles aumentan y muchas de las medidas tomadas en el Acuerdo de París fueron dedicadas a reducir este nivel de emisiones anuales. En especial las medidas van destinadas al sector del transporte, responsable de más del 16% de las emisiones mundiales. Los motores térmicos utilizan gasolina o diésel para moverse, combustibles que emiten gran cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero. Por ello, se están impulsando y desarrollando tecnologías alternativas como los vehículos eléctricos, de hidrógeno o solares.

El objetivo del proyecto es ayudar a las empresas al proceso de reducir sus emisiones de partículas contaminantes en una época de incertidumbre y urgencia como la que vivimos. Por tanto, este ODS está completamente relacionado con el objetivo del proyecto ya que se trata de adoptar medidas para combatir el cambio climático, en este caso, reduciendo las emisiones de las flotas de vehículos de las empresas del sector del transporte.

El cambio climático es un problema global que afecta a todos los países y personas del planeta afectando a la salud de muchas personas incluso causando muertes. Es por ello que la herramienta desarrollada en el proyecto tiene como características fundamentales la replicabilidad y escalabilidad. Con ello se pretende que se pueda utilizar en cualquier empresa sin perder capacidad si es utilizada en otro país, sectores diferentes y flotas totalmente diferentes entre sí.

5.1.2.2 ODS 7: Energía asequible y no contaminante

Hace décadas la forma de generar energía se basaba en tecnologías contaminantes y no sostenibles como por ejemplo la quema de carbón, de gas natural o la energía nuclear. Actualmente la sociedad se ha concienciado en las ventajas de las energías renovables haciendo que se fomenten mediante incentivos y ayudas. Por otro lado, la eficiencia energética sigue mejorando, teniendo menos pérdidas en la generación de energía y abaratando los costes debidos al desarrollo de la tecnología.

La contaminación del aire es un gran problema en la actualidad, sobre todo en las grandes ciudades. En ella, los niveles de partículas contaminantes (PM_{2,5}) son muy elevados y suponen el 75% de todas las partículas emitidas en un año. En algunos países, esta contaminación se produce en locales cerrados al utilizar el combustible para la energía doméstica que causó cerca de 4,3 millones de muertes en 2012, de las cuales la mayoría fueron mujeres y niñas.

El desarrollo de tecnologías limpias para los vehículos es también un gran reto para el futuro inmediato. Actualmente la mayoría de automóviles circulan gracias a combustibles contaminantes como el diésel y la gasolina. El sector del transporte es el que más emisiones producen, un 28% del total de emisiones de efecto invernadero en España. El petróleo supone más del 40% de la energía primaria y produce el 52% de las emisiones de dióxido de carbono cada año.

Debido a la situación que se vive actualmente, es necesario desarrollar otras tecnologías alternativas a los motores térmicos. Para ello, las empresas están invirtiendo en I+D con el fin de acelerar el proceso, mejorar la eficiencia energética de las tecnologías e intentar conseguir su implementación en el mercado lo antes posible. Por su parte, los gobiernos tratan mediante ayudas e incentivos fomentar el desarrollo de las tecnologías en las empresas y la compra de los vehículos de bajas emisiones por parte del usuario.

El proyecto fomenta la integración de las tecnologías de bajas emisiones en la flota de vehículo de las empresas, haciendo que sus emisiones de CO₂ disminuyan y, por tanto, la contaminación medioambiental sea menor sobre todo en las ciudades donde muchas empresas de transporte operan. Por ello, uno de los objetivos del proyecto es introducir en las flotas de vehículos de las empresas automóviles que no sean contaminantes y se muevan utilizando una energía limpia que no sea contaminante. Además, los combustibles que se han utilizado hasta proceden del petróleo, componente no renovable y que, si se sigue consumiendo al ritmo actual, no se podrá asegurar los recursos para futuras generaciones, uno de los objetivos fundamentales de los ODS.

5.1.2.3 ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles

Desde hace décadas se ha vivido un proceso de urbanización. Cada vez más personas viven en núcleos urbanos con gran densidad de población. En la actualidad más de la mitad de la población vive en las ciudades y se espera que para el año 2030 la cantidad aumente al 60%. Las ciudades se caracterizan por concentrar en poca superficie una gran cantidad de personas, industria y servicios. Sin embargo, las ciudades suponen el 70% de las emisiones de CO₂ mundiales y más del 60% de los recursos aunque solo ocupen el 3% de la superficie.

Debido a la gran densidad de población, la cantidad de vehículos que circulan diariamente por sus calles es muy grande provocando grandes congestiones del tráfico. Estas situaciones, además de provocar retrasos en el viaje de los usuarios, suponen una gran producción de partículas contaminantes. El 90% de la población de las ciudades respiraba un aire que tenía una concentración de partículas contaminantes mayor a las establecidas por la OMS. La consecuencia es que alrededor de 4,2 millones de muertes son provocadas debido a la contaminación medioambiental de las ciudades.

Por otro lado, debido a la congestión del tráfico, los niveles de contaminación acústica a los que se enfrentan la población a diario son elevados y perjudiciales para la salud, pudiéndoles ocasionar insomnio, mareos y náuseas. En la siguiente gráfica se puede observar la congestión del tráfico en la ciudad de Madrid a lo largo de una semana, siendo muy alto en las horas punta del día entre diario, cuando las personas inician y finalizan su jornada laboral.

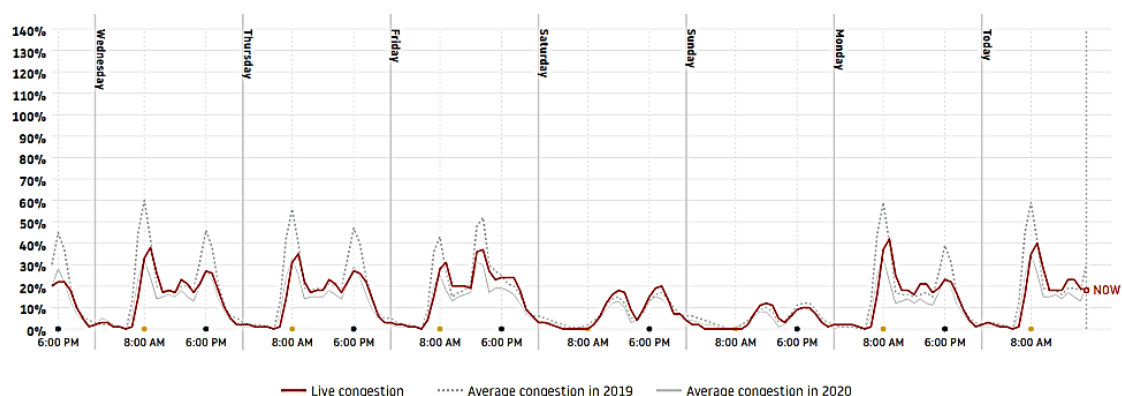


Figura 27: Congestión del tráfico en la ciudad de Madrid

El proyecto se basa en ayudar a las empresas a planificar la incorporación de vehículos eléctricos a su flota para reducir su nivel de emisiones de CO₂. Debido a ello, las empresas de transporte realizarán sus rutas con vehículos eléctricos que no son contaminantes y no emiten casi sonido. Con ello se pretende que en las ciudades, donde operan muchas empresas de transporte, se reduzca la contaminación producida por los vehículos y que los automóviles no sean una fuente de contaminación acústica en grandes núcleos urbanos.

5.1.2.4 ODS 3: Salud y bienestar

Este Objetivo de Desarrollo Sostenible persigue garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades. La contaminación ambiental produce cerca de 4,2 millones de muertes al año, por lo que hay que considerarlo un problema de salud grave. Esto es debido a que alrededor del 60% de la población mundial vive en las ciudades, zonas donde se produce el 70% de las emisiones totales de dióxido de carbono y otras partículas altamente contaminantes.

Las ciudades más contaminantes del mundo se encuentran en China, India o Bangladesh mientras que las europeas se sitúan en países de Serbia y Bosnia. Estas ciudades se encuentran en un nivel perjudicial para la salud según los parámetros establecidos por la Organización Mundial de la Salud. Los habitantes de estas ciudades están respirando un aire que no es saludable y puede derivar en enfermedades cardíacas y pulmonares. Según la OMS, el 90% de la población de las ciudades respira un aire perjudicial para su salud.

Según un estudio del Hospital Gregorio Marañón, en la ciudad de Madrid existen más hospitalizaciones de enfermedades naturales los días que mayor nivel de contaminación hay en la capital de España. En el siguiente gráfico se muestra la relación que existe en un estudio llevado a cabo durante 5 años.

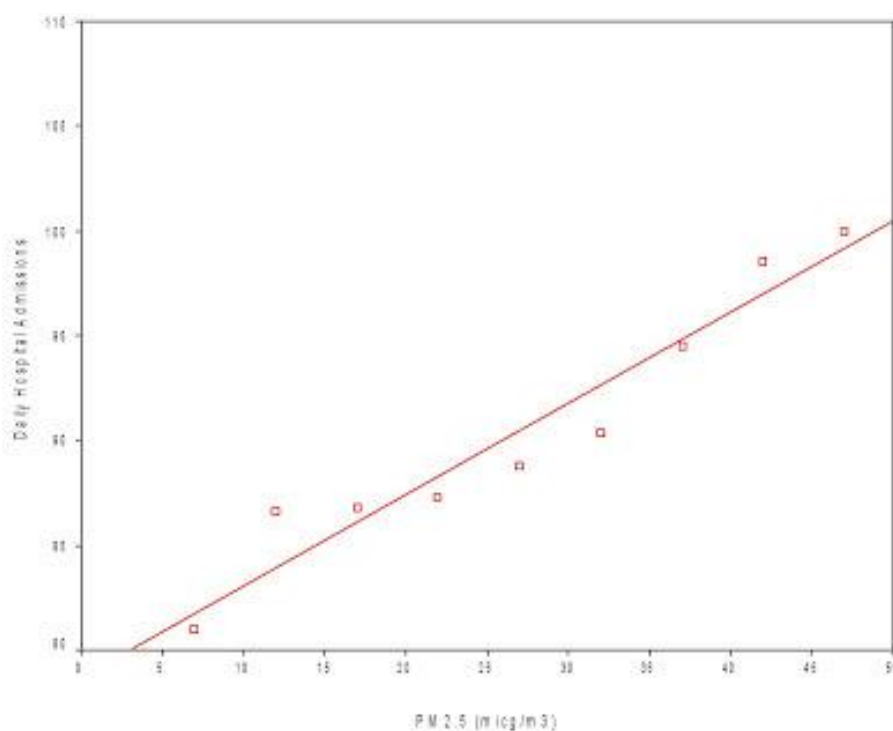


Figura 28: Relación entre las hospitalizaciones y los niveles de contaminación

Gran parte de las emisiones producidas anualmente en las ciudades tiene como causa el transporte en ellas debido a la gran congestión que se puede encontrar en ellas en algunos puntos del día. Utilizando la herramienta creada, se pretende guiar a las empresas de transporte hacia una electrificación de la flota. Las consecuencias de esto será que habrá más vehículos de bajas emisiones en las ciudades pudiendo reducir el nivel de contaminación ambiental producido por el sector del transporte en ellas.

Por otro lado, debido a la congestión del tráfico, los niveles de contaminación acústica a los que se enfrentan la población a diario son elevados y perjudiciales para la salud, pudiéndoles ocasionar insomnio, mareos y náuseas. En España, cerca de 9 millones de personas viven diariamente por encima del umbral del dolor lo que provoca problemas de salud en ellos. Entre estos problemas se encuentran pérdida de la audición, mareos, náuseas e insomnio. La incorporación de vehículos eléctricos a las flotas de empresas supondrá la eliminación de gran parte del ruido de las ciudades, sobre todo en las horas punta del día donde la congestión del tráfico es muy alta.

Otros Objetivos de desarrollo sostenible indirectos del proyecto son los siguientes:

ODS 2: Hambre cero

Como se ha comentado debido al aumento de la temperatura de la tierra, se ha reducido la cantidad de cereales producidos en un 5%, lo que significa 40 megatonnes menos anualmente a nivel mundial. Actualmente 690 millones de personas padecen hambre en el mundo, lo que significa el 8,9% de toda la población. Cerca de 135 millones de personas padecen hambre severa y más de 250 millones de personas se encuentran al borde de la hambruna.

Con el uso de vehículos eléctricos en lugar de automóviles con motor térmico, se pretende reducir la producción de partículas contaminantes a la atmósfera con el fin de que no aumente la temperatura global y no se sigan perdiendo cultivos en el mundo mientras haya personas que no puedan comer.

ODS 6: Agua limpia y saneamiento

Debido al aumento de las temperaturas, los océanos se están calentando, provocando el deshielo de los polos y el aumento del nivel del mar en 19 cm entre 1901 y 2010, produciendo una pérdida de hielo de 1,07 millones de km² cada década. Las Naciones Unidas prevén una elevación de entre 40 y 63 cm para 2100 que afectaría a gran parte de las ciudades ubicadas en la costa.

Los glaciares actúan de depósitos de agua naturales que almacenan agua durante el invierno y la liberan en el verano cuando se derrite. Al aumentar la temperatura de la tierra, habrá más agua en estado líquido en los glaciares que hará que se evapore más rápidamente. La desaparición de los glaciares tiene como consecuencia menos agua dulce para la población por lo que se produce una escasez del agua.

La incorporación de los vehículos eléctricos a las flotas comerciales hará que se reduzcan notablemente las reducciones de emisiones de la empresa y, por tanto, del planeta. El sector del transporte emite el 16% de las partículas contaminantes de CO₂. Estas partículas son parte de la causa del aumento de la temperatura, el deshielo de los polos, el aumento del nivel del mar y la escasez de agua.

ODS 14: Vida submarina

Los océanos cubren un 75% de nuestro planeta donde viven casi 200.000 especies identificadas aunque hay muchas más no conocidas. Los océanos absorben en torno al 30% del CO₂ que se produce anualmente. El exceso de dióxido de carbono en los océanos es responsable del blanqueamiento de los corales.

Debido al aumento de las temperaturas, los océanos se están calentando, provocando el deshielo de los polos y el aumento del nivel del mar en 19 cm entre 1901 y 2010, produciendo una pérdida de hielo de 1,07 millones de km² cada década. Los océanos absorben el 90% del calor terrestre lo que significa unos 0,002 grados en profundidades de 500 a 2.000 metros y unos 0,005 grados de 0 a 500 metros. Desde 1991 los océanos se habrían calentado 6,5 grados Celsius

El derretimiento de los glaciares provocará la extinción de especies en los próximos años. Actualmente existen 25.000 especies que están en peligro de extinción. El cambio climático podría ser responsable del 8% de las extinciones de animales submarinos. Esto se debe a la acidificación del océano ya que las especies no pueden adaptarse al cambio en concentraciones de CO₂ al igual que los corales, especie que puede extinguirse en la segunda mitad del siglo.

El proyecto tiene como objetivo guiar a las empresas para reducir sus emisiones de CO₂ lo que implicará una reducción general de las emisiones, disminuyendo por un lado la temperatura del planeta y, por otro, la reducción de los niveles de CO₂ en los océanos.

5.1.3 Futuros desarrollos

Durante el proyecto se ha creado una herramienta para simular casos de estudios para las flotas de vehículos de las empresas. A medida que se ha realizado el proyecto se han encontrado distintas mejoras de la herramienta que no se han implementado porque quedaban fuera del alcance del proyecto.

En primer lugar, la herramienta podría incluir otras tecnologías distintas al diésel y al eléctrico como podrían ser los vehículos híbridos o de hidrógeno. Para ello habría que analizar como variará a lo largo del estudio distintos factores a tener en cuenta para el análisis económico de los automóviles del mercado. Por ejemplo, cómo varía el precio de los vehículos de esa tecnología a lo largo del estudio, los costes de mantenimiento de esta tecnología, consumos, precio del combustible, etc.

De momento no se ha incluido en la simulación por falta de información de la evolución de la tecnología o por qué todavía no se encuentran vehículos en el mercado. Cuando haya más estudios acerca de estas tecnologías y cómo se van a comportar a medio o largo plazo, se implementará en la herramienta para dotarla de más flexibilidad y riqueza.

En segundo lugar, los vehículos que se introducen en el mercado son aptos para comprar desde el año que se hace la simulación, aunque luego se escojan o no según interese. Este planteamiento no tiene por qué ser cierto ya que puede que haya vehículos eléctricos que no se vendan hasta dentro de 4 años y queramos tenerlos en cuenta en la simulación.

Por ello, se debería de introducir como dato de cada vehículo del mercado en que año empieza a estar disponible el vehículo así como la información económica para el primer año que puede ser comprado, no el del primer año del estudio.

Otro punto interesante sería introducir una tasa de amortización en lugar de una amortización constante en el periodo de amortización. Actualmente, la depreciación del vehículo se obtiene dividiendo el precio de adquisición entre los años de amortización. Sin embargo, hay países que pueden querer utilizar otro método de amortización en el cual hay un porcentaje de la amortización restante que se amortiza al siguiente año. Este desarrollo podría valorarse si la herramienta la utilizara algún país que lo necesitase, aunque este método está en desuso.

En cuanto al método de elección de los vehículos a retirar, actualmente se escogen por un coeficiente calculado según la edad y los kilómetros acumulados del automóvil. Este método suele ser el utilizado por la mayoría de empresas ya que conlleva intrínsecamente otros factores como puede ser el porcentaje de disponibilidad o las averías que tiene el vehículo. En una versión futura de la herramienta, esta elección se podría decidir utilizando algoritmos genéticos. En esta optimización de la retira de vehículos de la flota, la herramienta seguiría una trayectoria inicial que iría variando para alcanzar el objetivo del estudio mientras que con cierta frecuencia analiza trayectorias aleatorias para comprobar que va por buen camino.

Por otro lado, se ha decidido que el número de vehículos a reemplazar sea constante cada año del estudio según la tasa de reemplazo que haya marcado el usuario. Esto es, teóricamente, la situación ideal de las empresas puesto que pueden preparar mejor su

presupuesto anual de una forma constante lo que les permite tener un cash flow más estable que pueden destinar a otras partidas.

Sin embargo, en la realidad esto no siempre se puede conseguir. Hay empresas que no tienen como objetivo una tasa de reemplazo constante si no mantener una edad o kilómetros acumulados medios de la flota en un valor constante. Más adelante se podría desarrollar una nueva versión donde el usuario escoja como quiere seleccionar los vehículos a retirar de su flota entre varias opciones disponibles como las que se han mencionado.

Otros desarrollos se podrían llevar a cabo si se tuviera más información acerca de los vehículos de la flota. Por ejemplo, sería interesante conocer como varía el coste de mantenimiento del vehículo, que debe de ser mayor en cada año del estudio. Además, cuando un vehículo es más antiguo emite más emisiones pero esto no se ha tenido en cuenta en el estudio por la falta de información acerca del comportamiento de estas variables.

Por último, el análisis económico se realiza en base al periodo de amortización introducido por el usuario. El periodo de amortización teóricamente debería de ser el mismo que la vida útil del vehículo aunque muchas veces no lo es. Las empresas utilizan esta suposición para los análisis económicos y es la que se ha utilizado en esta versión de la herramienta.

Sin embargo, lo correcto teóricamente sería saber cuándo se va a retirar el vehículo que se va a incorporar para poder saber cuántos años va a estar en activo. Una vez se sabe sus años de servicio, se puede calcular el NPV teniendo en cuenta su vida útil en lugar del periodo de amortización. Este método sería el más correcto a nivel teórico pero no es usado nunca por las empresas por lo que no es del todo práctico.

6 Referencias

- Aegonam. (s.f.). Obtenido de <https://ovacen.com/evolucion-coche-electrico/>
- Ahani, P., & Melo, S. (2016). A portfolio approach for optimal fleet replacement toward sustainable urban freight transportation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 357-368.
- Alonso Fustel, E., Martínez Rueda, T., & Cambra Cotín, K. (2005). Evaluación en cinco ciudades españolas del impacto en salud de la contaminación atmosférica por partículas. *Esp Salud pública*, 297-308.
- Álvaro Hermana, R. (2017). Estrategias de gestión de flotas de vehículos eléctricos. *Madrid: Universidad Politécnica de Madrid*.
- Ayuntamiento de Madrid. (2020). *Madrid.es*. Obtenido de <https://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/Medio-ambiente/Las-30-medidas?vnextfmt=default&vnextoid=0590b83903a50610VgnVCM1000001d4a900aRCRD&vnextchannel=3edd31d3b28fe410VgnVCM1000000b205a0aRCRD>
- Berylls Strategy Advisors. (08 de 07 de 2019). Obtenido de https://www.berylls.com/wp-content/uploads/2019/07/20190708_Berylls_Fuelban.pdf
- Billington, J. (s.f.). *Stadia Magazine*. Obtenido de Johan Crujff Arena switches on Europe's largest energy storage system created from EV batteries: <https://www.stadia-magazine.com/news/stadium-sustainability/johan-crujff-arena.html>
- Cestau Cubero, S. (2014). Sostenibilidad técnica, económica y ambiental de flotas comerciales de vehículos eléctricos. *Barcelona: universidad Politécnica de Catalunya*.
- Ecologistas En Acción. (1 de Septiembre de 2008). *¿Qué son las PM2,5 y cómo afectan a nuestra salud?* Obtenido de <https://www.ecologistasenaccion.org/17842/que-son-las-pm25-y-como-afectan-a-nuestra-salud/>
- Ezzati, M., D.Lopez, A., Rodgers, A., & Murray, C. (2004). Comparative Quantification of Health Risks. *World Health Organization*.
- Grosso de la Vega, R. (2017). Optimización Sostenible y Gestión Eficiente de Flotas Urbanas. *Sevilla: Universidad de Sevilla*.
- Henze, V. (16 de Diciembre de 2020). *Bloomberg NEF*. Obtenido de <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh/>
- Hermanos Laredo. (27 de Diciembre de 2019). Historia del transporte de mercancías en España. Obtenido de <http://www.hermanoslaredo.com/transporte-de-mercancias-historia/>

Referencias

- Iberdrola. (s.f.). *Iberdrola*. Obtenido de <https://www.iberdrola.com/medio-ambiente/que-es-contaminacion-acustica-causas-efectos-soluciones>
- IQAir. (2020). *IQAir*. Obtenido de <https://www.iqair.com/es/world-most-polluted-cities?continent=&country=&state=&page=1&perPage=50&cities=>
- León Bello, J., González Viosca, E., Díaz Marqués, J., & Solir Castillo, J. (2016). Desarrollo de una herramienta de gestión de flotas de vehículos eléctricos. *La Rioja: Instituto Tecnológico del Embalaje, Transporte y Logística (ITENE)*.
- Linares, C., & Díaz, J. (2008). Las MP2,5 y su afección a la salud. *ecologista*, N°8.
- Lopez, M. (2009). El atasco nuestro de cada día. *Tráfico y seguridad vial*, N°198.
- Melero, J. (2019). La evolución del transporte terrestre. *Transgesa*.
- Mimi Hearing Technoogy. (3 de Marzo de 2020). *Mimi Hearing Technoogy*. Obtenido de <https://www.mimi.io/en/blog/world-hearing-map-2020>
- Ministerio de Fomento. (Abril de 2016). El transporte urbano metropolitano en España. Obtenido de <https://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/02ED782D-0A8E-462B-83D0-CCE67E4B51CD/137112/TransporteUrbano.pdf>
- Ministerio de Fomento. (2019). Informe Anual 2018. *Observatorio del Transporte y la Logística en España*.
- Ministerio para la transición ecológica. (s.f.). *Miteco*. Obtenido de <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/contaminacion-acustica/>
- Moreno, S. (2 de Julio de 2019). Adiós a los vehículos eléctricos silenciosos. *El País*.
- Mosquete, V., & Gilmartín, S. (2015). 15 Conferencia Internacional de Movilidad. *Integración: Revista digital sobre discapacidad visual*.
- Murias, D. (2019). Historia d elos coches eléctricos. *Motor Pasión*.
- Novologística. (2019). Cómo reducir los costes de transporte mediante un software logístico especializado. *Novologista.com*.
- Observatorio Cetelem. (2012). El vehículo eléctrico reduce la contaminación acústica. *El Observatorio Cetelem*.
- Orozco Medina, M., & Elizabeth, A. (2015). La importancia del control de la contaminación por ruido en las ciudades. *Ingeniería*, 129-136.
- Paratus People. (19 de Febrero de 2021). Obtenido de <https://paratuspeople.com/are-we-ready-to-switch-to-electric-cars/>
- Poshter, J., & Huang, C. (10 de Febrero de 2019). Climate Change Still Seen as the Top Global Threat, but Cyberattacks a Rising Concern. *Pew Research Center*. Obtenido de Pew Reserach Center.

Referencias

- Ritchie, H., & Roser, M. (2020). CO2 and Greenhouse Gas Emissions. *Our World in Data*.
- Rodríguez Ripa, L. (1 de Noviembre de 2017). *Pásate a lo eléctrico*. Obtenido de <https://pasatealoelectrico.es/2017/11/01/contaminacion-acustica-y-vehiculo-electrico/>
- Sancho, F. (9 de Enero de 2016). *Soy Motor*. Obtenido de <https://soymotor.com/coches/noticias/el-80-de-la-contaminacion-acustica-es-por-el-trafico-917000>
- Santa Lucía. (15 de Mayo de 2018). *Santalucia.es*. Obtenido de <https://www.santalucia.es/blog/contaminacion-acustica-consecuencias/>
- Thomson, I., & Bull, A. (2001). La congestión del tránsito urbano: causas y consecuencias económicas y sociales. *Cepal*.
- TOMTOM. (s.f.). *Traffic Index Madrid*. Obtenido de https://www.tomtom.com/en_gb/traffic-index/madrid-traffic
- TOMTOM. (s.f.). *Traffic Index Ranking*. Obtenido de https://www.tomtom.com/en_gb/traffic-index/ranking/
- United Nations. (2017). Obtenido de <https://population.un.org/wup/>
- World Resources Institute. (s.f.). *WRI*. Obtenido de <https://www.wri.org/cities>

Referencias

7 Anexos

7.1 Código de Matlab

```

%Borrado de las variables de anteriores Simulaciones
clear variables;
clc;
a=clock;

%Lectura de los parámetros, datos de la flota actual y datos de los
%vehículos en el mercado que se encuentran en el Excel "Fleet
Electrification Information"
fprintf('Leyendo datos del Excel. \n');
TA=xlsread('Fleet Electrification
Information.xlsx','Parameters','B11');
TS=xlsread('Fleet Electrification
Information.xlsx','Parameters','B10');
I=transpose(xlsread('Fleet Electrification Information.xlsx','Current
Fleet Information','A:A'));
[~,TF,~]=xlsread('Fleet Electrification Information.xlsx','Current
Fleet Information','B:B');
TF(1)=[];
TF=transpose(TF);
RF=transpose(xlsread('Fleet Electrification Information.xlsx','Current
Fleet Information','C:C'));
AM=transpose(xlsread('Fleet Electrification Information.xlsx','Current
Fleet Information','D:D'));
KA=transpose(xlsread('Fleet Electrification Information.xlsx','Current
Fleet Information','E:E'));
K=transpose(xlsread('Fleet Electrification Information.xlsx','Current
Fleet Information','F:F'));
L=transpose(xlsread('Fleet Electrification Information.xlsx','Current
Fleet Information','G:G'));
CF=transpose(xlsread('Fleet Electrification Information.xlsx','Current
Fleet Information','H:H'));
[~,AC,~]=xlsread('Fleet Electrification Information.xlsx','Current
Fleet Information','I:I');
AC(1)=[];
CRD=xlsread('Fleet Electrification
Information.xlsx','Parameters','B5');

```

Anexos

```
CRE=xlsread('Fleet Electrification
Information.xlsx','Parameters','B6');
TR=xlsread('Fleet Electrification
Information.xlsx','Parameters','B8');
R=xlsread('Fleet Electrification
Information.xlsx','Parameters','E:E');
[~,T,~]=xlsread('Fleet Electrification
Information.xlsx','Parameters','H:H');
IDN=transpose(xlsread('Fleet Electrification
Information.xlsx','Parameters','K:K'));

[~,MA,~]=xlsread('Fleet Electrification Information.xlsx','Market
Vehicles Information','A:A');
MA(1)=[];
MA=transpose(MA);
[~,MO,~]=xlsread('Fleet Electrification Information.xlsx','Market
Vehicles Information','B:B');
MO(1)=[];
MO=transpose(MO);
[~,TG,~]=xlsread('Fleet Electrification Information.xlsx','Market
Vehicles Information','C:C');
TG(1)=[];
TG=transpose(TG);
[~,TM,~]=xlsread('Fleet Electrification Information.xlsx','Market
Vehicles Information','D:D');
TM(1)=[];
TM=transpose(TM);
RM=transpose(xlsread('Fleet Electrification Information.xlsx','Market
Vehicles Information','E:E'));
PC=transpose(xlsread('Fleet Electrification Information.xlsx','Market
Vehicles Information','F:F'));
MN(:, :, 2)=transpose(xlsread('Fleet Electrification
Information.xlsx','Market Vehicles Information','G:G'));
SG(:, :, 2)=transpose(xlsread('Fleet Electrification
Information.xlsx','Market Vehicles Information','H:H'));
IC(:, :, 2)=transpose(xlsread('Fleet Electrification
Information.xlsx','Market Vehicles Information','I:I'));
PJ(:, :, 2)=transpose(xlsread('Fleet Electrification
Information.xlsx','Market Vehicles Information','J:J'));
```

Anexos

```
VR=transpose(xlsread('Fleet Electrification Information.xlsx','Market
Vehicles Information','K:K'));
CD=transpose(xlsread('Fleet Electrification Information.xlsx','Market
Vehicles Information','L:L'));
CE=transpose(xlsread('Fleet Electrification Information.xlsx','Market
Vehicles Information','M:M'));
CI=transpose(xlsread('Fleet Electrification Information.xlsx','Market
Vehicles Information','N:N'));
CA(:, :, 2)=transpose(xlsread('Fleet Electrification
Information.xlsx','Market Vehicles Information','O:O'));
[~,ACM,~]=xlsread('Fleet Electrification Information.xlsx','Market
Vehicles Information','P:P');
ACM(1)=[];
S=transpose(xlsread('Fleet Electrification Information.xlsx','Market
Vehicles Information','Q:Q'));
A=transpose(xlsread('Fleet Electrification Information.xlsx','Market
Vehicles Information','R:R'));
PE=transpose(xlsread('Fleet Electrification
Information.xlsx','Parameters','B15'));
PD=transpose(xlsread('Fleet Electrification
Information.xlsx','Parameters','B16'));
EL=transpose(xlsread('Fleet Electrification
Information.xlsx','Parameters','B18'));
PEM=transpose(xlsread('Fleet Electrification
Information.xlsx','Parameters','B19'));
IPC=transpose(xlsread('Fleet Electrification
Information.xlsx','Parameters','B21'));
IM=transpose(xlsread('Fleet Electrification
Information.xlsx','Parameters','B22'));
RE=transpose(xlsread('Fleet Electrification
Information.xlsx','Parameters','B23'));
OR=transpose(xlsread('Fleet Electrification
Information.xlsx','Parameters','B25'));
OR=-OR*100;
TAM=transpose(xlsread('Fleet Electrification
Information.xlsx','Parameters','B27'));
DAM=transpose(xlsread('Fleet Electrification
Information.xlsx','Parameters','B28'));
```

Anexos

```
[~,mre,~]=xlsread('Fleet Electrification
Information.xlsx','Parameters','B30');
fprintf('Datos del Excel leídos. \n');

C=[[0 0 1];[0 1 0];[1 1 0];[1 0 1];[0 1 1];[0 0 0]];
[CT,~]=size(C);

%Número de vehículos que se han de reemplazar
[~,F]=size(I);
TFC=0;
for i=1:F
    if strcmp(AC(i),'Compra')
        TFC=TFC+1;
    end
end
NC=round(TFC*TR);
tnc=cell(TS,NC);
inc=zeros(TS,NC);
ok=0;
rp=1;
close all;
f1=figure;
hold on;
f2=figure;
hold on

%Evolución del pra de los vehículos eléctricos
AEV=transpose(xlsread('Fleet Electrification
Information.xlsx','Evolución Coste Vehículo','A:A'));
PEV=transpose(xlsread('Fleet Electrification
Information.xlsx','Evolución Coste Vehículo','G:G'));
[~,AE]=size(AEV);

%Número de vehículos en el mercado
[~,NM]=size(TG);

%Número de rutas y tamaños de vehículos que pueden existir en la
Simulación 2
```


Anexos

```
[RMX,~]=size(R);
[TMX,~]=size(T);

%Definición de los KA medios y edades medias por categoría
KM=mean(K);
e=zeros(1,F);
for i=1:F
    e(1,i)=TA-AM(i);
end
KMV=zeros(TM, RMX);
EMV=zeros(TM, RMX);
cn=zeros(TM, RMX);
for i=1:F
    for j=1:TM
        if strcmp(TF(i), T(j,1))
            for k=1:RMX
                if RF(i)==R(k,1)
                    KMV(j,k)=KMV(j,k)+K(1,i);
                    EMV(j,k)=EMV(j,k)+e(1,i);
                    cn(j,k)=cn(j,k)+1;
                end
            end
        end
    end
end
for j=1:TM
    for k=1:RMX
        KMV(j,k)=KMV(j,k)/cn(j,k);
        EMV(j,k)=EMV(j,k)/cn(j,k);
    end
end

%Inicialización de los parámetros
cm=zeros(TS, TM, RMX, 2);
gl=zeros(1, NM, max(A)+1);
em=zeros(1, NM);
pe=zeros(1, NM, max(A)+1);
de=zeros(TS, NM, max(A)+1);
pra=zeros(TS, NM, max(A)+1);
```

Anexos

```
im=zeros (TS,NM,max (A) +1);
prd=zeros (TS,NM,max (A) +1);
cf=zeros (TS,NM,max (A) +1);
npv=zeros (TS,NM);
am=zeros (TS, TMX, RMX);

for t=1:TS
    %Bucle para el estudio del análisis económico
    fprintf('Realizando el análisis económico para el año %d.
\n', (t+TA));
    for i=1:NM
        for j=1:TMX
            if strcmp(TM(i),T(j,1))
                for k=1:RMX
                    if RM(i)==R(k,1)
                        %Para vehículos eléctricos
                        if strcmp(TG(i), 'Eléctrico')
                            act=0;
                            for ev=1:AE
                                if AEV(ev)==(TA+t) &&AEV(ev)~=max(AEV)
                                    PC(t+1,i)=PC(t,i)*(1+PEV(ev+1));
                                    act=1;
                                end
                            end
                            if act==0
                                PC(t+1,i)=PC(t,i);
                            end
                            %Para vehículos convencionales
                            elseif strcmp(TG(i), 'Diesel')
                                PC(t,i)=PC(1,i);
                            end
                            gl(1,i,2)=(CD(i)*PD+CE(i)*PE)*KM/100;
                            em(i)=CD(i)*EL*KM/100;
                            pe(1,i,2)=em(i)*PEM/1000;

                            if strcmp(ACM(i), 'Compra')
                                PS=1;
                                %Análisis económico de cada vehículo del
mercado
```

```

de(t,i,1)=0;
pra(t,i,1)=0;
im(t,i,1)=0;
prd(t,i,1)=0;
cf(t,i,1)=-PC(t,i)-CI(1,i);

for al=2:(A(i)+1)
    if al==2
        de(t,i,al)=PC(t,i)/A(i);
        pra(t,i,al)=-
(de(t,i,al)+MN(1,i,al)+SG(1,i,al)+IC(1,i,al)+PJ(1,i,al)+gl(1,i,al)+pe(
1,i,al)+CA(1,i,al));

        else
            de(t,i,al)=de(t,i,al-1)*(1+IPC);
            MN(1,i,al)=MN(1,i,al-1)*(1+IPC);
            SG(1,i,al)=SG(1,i,al-1)*(1+IPC);
            IC(1,i,al)=IC(1,i,al-1)*(1+IPC);
            PJ(1,i,al)=PJ(1,i,al-1)*(1+IPC);
            gl(1,i,al)=gl(1,i,al-1)*(1+IPC);
            pe(1,i,al)=pe(1,i,al-1)*(1+IPC);
            CA(1,i,al)=CA(1,i,al-1)*(1+IPC);
            pra(t,i,al)=-
(de(t,i,al)+MN(1,i,al)+SG(1,i,al)+IC(1,i,al)+PJ(1,i,al)+gl(1,i,al)+pe(
1,i,al)+CA(1,i,al));

            end
            im(t,i,al)=-pra(t,i,al)*IM;
            prd(t,i,al)=pra(t,i,al)+im(t,i,al);
            cf(t,i,al)=prd(t,i,al)+de(t,i,al);
            if al==(A(1,i)+1)

cf(t,i,al)=prd(t,i,al)+de(t,i,al)+VR(1,i);

            end
        end
elseif strcmp(ACM(i),'Alquiler')
    PS=2;
    cf(t,i,1)=-CI(1,i);
    pra(t,i,1)=0;
    im(t,i,1)=0;
    prd(t,i,1)=0;
    for al=2:(TAM+1)

```

Anexos

```
        if al==2
            de(t,i,al)=PC(t,i)*12;
            pra(t,i,al)=-
            (de(t,i,al)+MN(1,i,al)+SG(1,i,al)+IC(1,i,al)+PJ(1,i,al)+gl(1,i,al)+pe(
            1,i,al)+CA(1,i,al));

            else
                de(t,i,al)=de(t,i,al-1)*(1+IPC);
                MN(1,i,al)=MN(1,i,al-1)*(1+IPC);
                SG(1,i,al)=SG(1,i,al-1)*(1+IPC);
                IC(1,i,al)=IC(1,i,al-1)*(1+IPC);
                PJ(1,i,al)=PJ(1,i,al-1)*(1+IPC);
                gl(1,i,al)=gl(1,i,al-1)*(1+IPC);
                pe(1,i,al)=pe(1,i,al-1)*(1+IPC);
                CA(1,i,al)=CA(1,i,al-1)*(1+IPC);
                pra(t,i,al)=-
                (de(t,i,al)+MN(1,i,al)+SG(1,i,al)+IC(1,i,al)+PJ(1,i,al)+gl(1,i,al)+pe(
                1,i,al)+CA(1,i,al));

                end
                im(t,i,al)=-pra(t,i,al)*IM;
                prd(t,i,al)=pra(t,i,al)+im(t,i,al);
                cf(t,i,al)=prd(t,i,al);
            end
        end

        % Cálculo del NPV de cada vehículo
        npv(t,i)=pvvar(cf(t,i,:),RE);

        %Clasificación de los vehículos en el mercado
        según su ruta y
        %tamaño

        cm(t,j,k,PS)=cm(t,j,k,PS)+1;
        am(t,j,k,cm(t,j,k,PS),1,PS)=i;
        am(t,j,k,cm(t,j,k,PS),2,PS)=npv(t,i);
        am(t,j,k,cm(t,j,k,PS),3,PS)=em(1,i);
    end
end
end
end
```

Anexos

```
end
fprintf('Finalización del análisis económico para el año %d.
\n', (t+TA));
end

%Inicialización variables cálculo subsidio
mdv=zeros (TS, TMX, RMX, 2);
mev=zeros (TS, TMX, RMX, 2);
msv=zeros (TS, TMX, RMX, 2);
dm=zeros (TS, TMX, RMX, 2);
sp=zeros (TMX, RMX, 2);

%Cálculo subsidios
for t=1:TS
    for j=1:TMX
        for k=1:RMX
            for PS=1:2
                md=0;
                cd=0;
                me=0;
                ms=0;
                ce=0;
                for x=1:cm(t, j, k, PS)
                    if strcmp(TG(am(t, j, k, x, 1, PS)), 'Diesel')
                        md=am(t, j, k, x, 2, PS);
                        cd=cd+1;
                    elseif strcmp(TG(am(t, j, k, x, 1, PS)), 'Eléctrico')
                        me=am(t, j, k, x, 2, PS);
                        ms=S(am(t, j, k, x, 1, PS));
                        ce=ce+1;
                    end
                end
                mdv(t, j, k, PS)=md/cd;
                mev(t, j, k, PS)=me/ce;
                msv(t, j, k, PS)=ms/ce;
                dm(t, j, k, PS)=- (mev(t, j, k, PS) -mdv(t, j, k, PS));
                if dm(t, j, k, PS) <=0
                    dm(t, j, k, PS)=0;
                end
            end
        end
    end
end
```

Anexos

```
        if t==1
            sp(j,k,PS)=msv(t,j,k,PS)/dm(t,j,k,PS);
            if dm(t,j,k,PS)<=0
                sp(j,k,PS)=0;
            end
        else
            for x=1:cm(t,j,k,PS)
                if strcmp(TG(am(t,j,k,x,1,PS)),'Eléctrico')

S(t,am(t,j,k,x,1,PS))=dm(t,j,k,PS)*sp(j,k,PS);

cf(t,am(t,j,k,x,1,PS),1)=cf(t,am(t,j,k,x,1,PS),1)+S(t,am(t,j,k,x,1,PS)
);

am(t,j,k,x,2,PS)=am(t,j,k,x,2,PS)+S(t,am(t,j,k,x,1,PS));
            npv(t,am(t,j,k,x,1,PS))=am(t,j,k,x,2,PS);
                end
            end
        end
    end
end
end

%Bucle hasta que se consigan la reducción de CO2 deseada
while ok==0

    IDN=transpose(xlsread('Fleet Electrification
Information.xlsx','Parameters','K:K'));

    %Inicialización de los parámetros
    ef=zeros(TS,F);
    c=zeros(TS,TFC);
    b=zeros(1,TFC);
    po=zeros(TS,NC);
    irc=zeros(TS,NC);
    ira=zeros(TS,1);
    m=zeros(1);
    rr=zeros(TS,NC);
```

Anexos

```
ac=cell(TS,NC);
iin=zeros(TS,NC);

fprintf('Decidiendo los vehículos a reemplazar. \n');
%Bucle con los años de realización del estudio
for t=1:TS

    %Creación de los coeficientes de los vehículos por año y de
    las
    %emisiones
    x=1;
    for i=1:F
        ef(1,i)=CF(1,i)*EL*KM/100;
        if strcmp(AC(i),'Compra')
            for j=1:TMX
                if strcmp(TF(i),T(j,1))

c(t,i)=KA(t,i)*CRD/KMV(j,RF(i))+e(t,i)*CRE/EMV(j,RF(i));
                    end
                    end
                b(i)=c(t,i);
            elseif strcmp(AC(i),'Alquiler')
                if e(t,i)>=TAM||KA(t,i)>=DAM
                    ira(t,x)=I(t,i);
                    x=x+1;
                end
            end
        end
    end

    %Encontrar los vehículos comprados que se han de reemplazar
    i=1;
    while i<=NC
        [val, pos]=max(b);
        po(t,i)=pos;
        irc(t,i)=I(t,po(t,i));
        b(pos)=-1;
        i=i+1;
    end
end
```

Anexos

```
[~,NA]=size(ira(t,:));

%Creación de vector con los identificadores y tamaños de los
coches
%reemplazados
j=1;
for i=1:F
    if strcmp(AC(i),'Compra')
        for k=1:NC
            if I(t,i)==irc(t,k)
                inc(t,j)=I(t,i);
                tnc(t,j)=TF(i);
                rr(t,j)=RF(i);
                ac(t,j)=AC(i);
                j=j+1;
            end
        end
    elseif strcmp(AC(i),'Alquiler')
        for m=1:NA
            if I(t,i)==ira(t,m)
                inc(t,j)=I(t,i);
                tnc(t,j)=TF(i);
                rr(t,j)=RF(i);
                ac(t,j)=AC(i);
                j=j+1;
            end
        end
    end
end

fprintf('Vehículos comprados reemplazados en el año
%d:\n', (t+TA));
irc(t,:);

x=1;
m=[];
```


Anexos

```
for i=1:NA
    if ira(t,i)~=0
        m(1,x)=ira(t,i);
        x=x+1;
    end
end
[~,tm]=size(m);
fprintf('Vehículos alquilados reemplazados en el año
%d:\n', (t+TA));
if tm~=0
    m(1,:)
else
    fprintf('No hay vehiculos alquilados a reemplazar en el
año %d. \n', (t+TA));
end

%Bucle para todos los vehiculos de la flota actual para
modificar su
%I, KA y e para el siguiente año
p=1;

for i=1:F
    ca=0;
    for j=1:NC
        if I(t,i)==irc(t,j)
            ca=1;
        end
    end
    for j=1:NA
        if I(t,i)==ira(t,j)
            ca=1;
        end
    end
    if ca==1
        I(t+1,i)=IDN(1);
        iin(t,p)=IDN(1);
        p=p+1;
        e(t+1,i)=0;
        KA(t+1,i)=0;
        IDN(1)=[];
    end
end
```

Anexos

```
        if IDN(1)==0
            fprintf('Se necesitan más identificadores nuevos.
Por favor, introduzcalos en el Excel y vuelva a simular el programa.
\n');
        end
    elseif ca==0
        I(t+1,i)=I(t,i);
        e(t+1,i)=e(t,i)+1;
        for j=1:TMX
            if strcmp(TF(i),T(j,1))
                KA(t+1,i)=KA(t,i)+KMV(j,RF(i));
            end
        end
    end
end
end

fprintf('Realizando la optimización del estudio. \n');

ered=zeros(TS+1,F);
nmax=size(inc,2);
for t=1:TS
    if t==1
        ered(t,:)=ef(t,:);
        ered(t+1,:)=ered(t,:);
    else
        ered(t+1,:)=ered(t,:);
    end
    for i=1:F
        for n=1:nmax
            if inc(t,n)==I(t,i)
                ered(t+1,i)=0;
            end
        end
    end
end
end
rmax=(-(sum(ered(1,:))-sum(ered(TS,:))))/sum(ered(1,:))*100;

if rmax<=OR
```

Anexos

```
l=0;
evl=zeros(1,10000);
ite=1;
rt=zeros(1,10000);
cr=zeros(TS,nmax,1,1);
cs=zeros(TS,nmax,1,1);
er=zeros(TS,nmax,1,1);
cra=zeros(TS,nmax,10000);
csa=zeros(TS,nmax,10000);
era=zeros(TS,nmax,10000);
crt=zeros(1,10000);
cst=zeros(1,10000);
ert=zeros(1,10000);
vi=zeros(TS,nmax,1,1);
via=zeros(TS,nmax,10000);
vit=zeros(TS,nmax);
red=zeros(1,10000);
s=0;
u=0;
npvo=0;
redopti=Inf;
no=0;
redno=0;
yes=0;
redyes=0;

%Hallando el reemplazo más barato para cada vehículo que se
retira
%de la flota, teniendo en cuenta el precio sombra de
emisiones.
while (l==1)
    for t=1:TS
        for n=1:nmax
            for j=1:TMX
                if strcmp(T(j),tnc(t,n))
                    for z=1:2
                        for x=1:cm(t,j,rr(t,n),z)
cr(t,n,x,z,ite)=am(t,j,rr(t,n),x,2,z);
```

Anexos

```
cs(t,n,x,z,ite)=cr(t,n,x,z,ite)-
am(t,j,rr(t,n),x,3,z)*1;

er(t,n,x,z,ite)=am(t,j,rr(t,n),x,3,z);

vi(t,n,x,z,ite)=am(t,j,rr(t,n),x,1,z);
    end
end
for z=1:2
    for x=1:cm(t,j,rr(t,n),z)
        if csa(t,n,ite)==0
            cra(t,n,ite)=cr(t,n,x,z,ite);
            csa(t,n,ite)=cs(t,n,x,z,ite);
            era(t,n,ite)=er(t,n,x,z,ite);
            via(t,n,ite)=vi(t,n,x,z,ite);
        else
            if
csa(t,n,ite)<cs(t,n,x,z,ite)

cra(t,n,ite)=cr(t,n,x,z,ite);

csa(t,n,ite)=cs(t,n,x,z,ite);

era(t,n,ite)=er(t,n,x,z,ite);

via(t,n,ite)=vi(t,n,x,z,ite);

elseif
            if
csa(t,n,ite)==cs(t,n,x,z,ite)

era(t,n,ite)<er(t,n,x,z,ite)

cra(t,n,ite)=cr(t,n,x,z,ite);

csa(t,n,ite)=cs(t,n,x,z,ite);

era(t,n,ite)=er(t,n,x,z,ite);

via(t,n,ite)=vi(t,n,x,z,ite);

            end
        end
    end
end
```



```

        end
        u=0;
    else
        if ite<=2
            yes(1,1)=1;
            redyes(1,1)=red(1,ite);
        else
            yes(1,end+1)=1;
            redyes(1,end+1)=red(1,ite);
        end
        u=1;
    end

    hold on
    figure(f1);
    gi=cell(1,1);

h=scatter(cst(1,ite),rt(1,ite),[],'MarkerEdgeColor',C(rp,:));
    for t=1:TS
        gi=cell(1,1);
        for n=1:nmax
            if vit(t,n,ite)~=0
                gi(1,1)=strcat(num2str(t+TA),'-',
',ACM(vit(t,n,ite))','-',MA(vit(t,n,ite))','-',MO(vit(t,n,ite)));
h.DataTipTemplate.DataTipRows(end+1)=dataTipTextRow('Vehiculo',gi(1,1)
);

        end
    end
end

hold on
figure(f2);
gi=cell(1,1);

m=scatter(crt(1,ite),rt(1,ite),[],'MarkerEdgeColor',C(rp,:));
    for t=1:TS
        gi=cell(1,1);
        for n=1:nmax
            if vit(t,n,ite)~=0

```

Anexos

```
                gi(1,1)=strcat(num2str(t+TA),'-
',ACM(vit(t,n,ite)),'-',MA(vit(t,n,ite)),'-',MO(vit(t,n,ite)));

m.DataTipTemplate.DataTipRows(end+1)=dataTipTextRow('Vehiculo',gi(1,1)
);

                end
            end
        end

        if ite==1
            l=1000000;
        else
            if u==0
                v(1,ite)=0.5;
                l=evl(1,ite)+abs(evl(1,ite)-yes(1,end))*(1-
v(1,ite));
            else
                v(1,ite)=0.5;
                l=evl(1,ite)-abs(evl(1,ite)-no(1,end))*(1-
v(1,ite));
            end
        end
    end

    if strcmp(mre,'Reducción necesariamente mayor al
objetivo')
        mop=rt(1,ite)<=OR;
    elseif strcmp(mre,'Reducción más cercana al objetivo')
        mop=red(1,ite)<=redopti;
    end
    if mop
        if red(1,ite)==redopti
            if crt(1,ite)>npvo
                npvoa=cra(:, :, ite);
                npvo=crt(1,ite);
                redopti=red(1,ite);
                ro=rt(1,ite);
                eo=eft(:, :, ite);
                io=vit(:, :, ite);
            end
        end
    end
end
```

```

        else
            npvoa=cra(:, :, ite);
            npvo=crt(1, ite);
            redopti=red(1, ite);
            ro=rt(1, ite);
            eo=eft(:, :, ite);
            io=vit(:, :, ite);
        end
    end
end

ite=ite+1;

if rt(1,1)<=OR
    ok=1;
    break;
end
if ite>2
    if round(evl(1, ite-1), 4)==round(evl(1, ite-2), 4)
        s=s+1;
        if s>=10
            ok=1;
            break;
        end
    end
end
end
end

end

end

%Si no es posible conseguir la reducción de ef deseada, se
%aumenta la tasa de reemplazo para poder conseguirla.
if ok==0
    rp=rp+1;
    if rp>CT
        rp=1;
    end
    fprintf('No se puede conseguir esa reducción de ef con un %s
de reemplazo. La máxima reducción con esta tasa es %s por
cientos.\n', TR, rmax);
    NC=NC+1;

```


Anexos

```
TR=NC/F;
fprintf('Se realizará la simulación con un %s de reemplazo.
\n',TR);
end
end

figure(f2);
gi=cell(nmax*TS);
m=scatter(npvo,ro,[],'MarkerEdgeColor',[1 0 0]);
for t=1:TS
    gi=cell(1,1);
    for i=1:nmax
        if io(t,i)~=0
            gi(1,i)=strcat(num2str(t+TA),'-',ACM(io(t,i)),'-
',MA(io(t,i)),'-',MO(io(t,i)));

m.DataTipTemplate.DataTipRows(end+1)=dataTipTextRow('Vehiculo
Optimo',gi(1,i));
end
end
end
hold off

%Escribir los resultados en el fichero Excel
file1=char(strcat('Fleet','-','Electrification','-','Results','-
',num2str(a(3)),'-',num2str(a(2)),'-',num2str(a(4)),'-
',num2str(a(5)),'.xlsx'));
file2=char(strcat('Fleet','-','Electrification','-','Economic','-
','Results','-','Results','-','Results','-','Results','-
',num2str(a(3)),'-',num2str(a(2)),'-',num2str(a(4)),'-
',num2str(a(5)),'.xlsx'));

fprintf('Escribiendo resultados en el fichero Excel. \n');
for t=1:TS
    ri=zeros(1,1);
    rac=cell(1,1);
    rin=zeros(1,1);
    rtn=cell(1,1);
    rrn=zeros(1,1);
    rn=zeros(1,1);
```

Anexos

```
for i=1:nmax
    if inc(t,i)~=0
        ri(1,i)=inc(t,i);
        rac(1,i)=ac(t,i);
        rin(1,i)=iin(t,i);
        rtn(1,i)=tnc(t,i);
        rrn(1,i)=rr(t,i);
        rn(1,i)=io(t,i);
    end
end

cabecera=[{'Año'},{'Identificador'},{'Tamaño'},{'Ruta'},{'Alquiler/Compra'},{'Identificador Nuevo'},{'Marca'},{'Modelo'},{'Tipo'},{'NPV'}];
xlswrite(file1,cabecera(1,:),num2str(t+TA),'A1');
xlswrite(file1,(t+TA),num2str(t+TA),'A2');
xlswrite(file1,transpose(ri(1,:)),num2str(t+TA),'B2');
xlswrite(file1,transpose(rtn(1,:)),num2str(t+TA),'C2');
xlswrite(file1,transpose(rrn(1,:)),num2str(t+TA),'D2');
xlswrite(file1,transpose(rac(1,:)),num2str(t+TA),'E2');
xlswrite(file1,transpose(rin(1,:)),num2str(t+TA),'F2');
xlswrite(file1,transpose(MA(rn(1,:))),num2str(t+TA),'G2');
xlswrite(file1,transpose(MO(rn(1,:))),num2str(t+TA),'H2');
xlswrite(file1,transpose(TG(rn(1,:))),num2str(t+TA),'I2');
xlswrite(file1,transpose(npv(t,rn(1,:))),num2str(t+TA),'J2');

end

[~,inpv,~]=xlsread('Fleet Electrification Information.xlsx','Reports','B3');
if strcmp(inpv,'Si')
    cabeceranpv=[{'Año'},{'NPV Año'},{'NPV Estudio'},{'Tasa de Reemplazo'}];
    xlswrite(file1,cabeceranpv,'NPV','A1');
    xlswrite(file1,transpose((1+TA):(TS+TA)),'NPV','A2');
    xlswrite(file1,sum(npvoa,2),'NPV','B2');
    xlswrite(file1,npvo,'NPV','C2');
    xlswrite(file1,TR,'NPV','D2');
end
```

Anexos

```
[~,iea,~]=xlsread('Fleet Electrification  
Information.xlsx','Reports','B4');  
if strcmp(iea,'Si')  
    cabecerareduccion=[{'Año'},{'Emisiones Año'},{'Reducción  
Estudio'}];  
    xlswrite(file1,cabecerareduccion,'Reducción Emisiones','A1');  
    xlswrite(file1,transpose((TA):(TS+TA)), 'Reducción  
Emisiones','A2');  
    xlswrite(file1,sum(eo,2), 'Reducción Emisiones','B2');  
    xlswrite(file1,ro, 'Reducción Emisiones','C2');  
end
```

```
[~,iif,~]=xlsread('Fleet Electrification  
Information.xlsx','Reports','B5');  
if strcmp(iif,'Si')  
    xlswrite(file1,(TA):(TS+TA), 'Identificadores Vehículos','A1');  
    xlswrite(file1,transpose(I(:,:)), 'Identificadores  
Vehículos','A2');  
end
```

```
[~,iet,~]=xlsread('Fleet Electrification  
Information.xlsx','Reports','B6');  
if strcmp(iet,'Si')  
    xlswrite(file1,(TA):(TS+TA), 'Edad Vehículos','A1');  
    xlswrite(file1,transpose(e(:,:)), 'Edad Vehículos','A2');  
end
```

```
[~,ida,~]=xlsread('Fleet Electrification  
Information.xlsx','Reports','B7');  
if strcmp(ida,'Si')  
    xlswrite(file1,(TA):(TS+TA), 'Kilómetros Acumulados  
Vehículos','A1');  
    xlswrite(file1,transpose(KA(:,:)), 'Kilómetros Acumulados  
Vehículos','A2');  
end
```

```
[~,ief,~]=xlsread('Fleet Electrification  
Information.xlsx','Reports','B8');  
if strcmp(ief,'Si')  
    xlswrite(file1,(TA):(TS+TA), 'Emisiones Vehículos','A1');
```

Anexos

```
        xlswrite(file1,transpose(eo(:,:)),'Emisiones Vehículos','A2');
end

[~,iem,~]=xlsread('Fleet Electrification
Information.xlsx','Reports','B9');
if strcmp(iem,'Si')
    for t=1:TS
        [~,n]=size(io(t,:));
        iemc=0;
        for i=1:n
            nu=1;
            for j=1:length(iemc)
                if io(t,i)==iemc(j)
                    nu=0;
                end
            end
        end
        if nu==1
            iemc=[iemc,io(t,i)];
            iemcres=[];
            for a=1:(A(1,io(t,i))+1)
                iemcres(1,a)=a-1;
                iemcres(2,a)=-de(t,io(t,i),a);
                iemcres(3,a)=-MN(1,io(t,i),a);
                iemcres(4,a)=-SG(1,io(t,i),a);
                iemcres(5,a)=-IC(1,io(t,i),a);
                iemcres(6,a)=-PJ(1,io(t,i),a);
                iemcres(7,a)=-gl(1,io(t,i),a);
                iemcres(8,a)=-pe(1,io(t,i),a);
                iemcres(9,a)=-CA(1,io(t,i),a);
                if a==1
                    iemcres(11,a)=-PC(t,io(t,i));
                    iemcres(12,a)=-CI(1,io(t,i));
                    iemcres(13,a)=S(t,io(t,i));
                elseif a==(A(1,io(t,i))+1)
                    iemcres(10,a)=VR(1,io(t,i));
                end
            end
            iemcres(14,a)=pra(t,io(t,i),a);
            iemcres(15,a)=im(t,io(t,i),a);
            iemcres(16,a)=prd(t,io(t,i),a);
            iemcres(17,a)=cf(t,io(t,i),a);
        end
    end
end
```

Anexos

```
end

    tl=char(strcat(MA(1,io(t,i)),'-',MO(1,io(t,i)),'-',
    num2str(t+TA)));
    cabeceraiem=[{'Año
Amortización'},{'Depreciación'},{'Mantenimiento'},{'Seguro'},{'Impuest
o Circulación'},{'Peaje'},{'Combustible'},{'Precio Emisiones'},{'Otros
Costes Anuales'},{'Valor Residual'},{'Valor Adquisición'},{'Otros
Costes Inversión'},{'Subsidio'},{'Precio Antes
Impuestos'},{'Impuestos'},{'Precio Después
Impuestos'},{'Cashflow'},{'NPV'}];
    xlswrite(file2,transpose(cabeceraiem),tl,'A1');
    xlswrite(file2,iemcres(:,:),tl,'B1');
    xlswrite(file2,npv(t,io(t,i)),tl,'B18');
end
end
end
end

[~,ien,~]=xlsread('Fleet Electrification
Information.xlsx','Reports','B10');
if strcmp(ien,'Si')
    xlswrite(file1,{'Año Estudio / Vehículo Mercado'},'NPV Vehículos
Mercado','A1');
    xlswrite(file1,(TA+1):(TS+TA),'NPV Vehículos Mercado','B1');
    xlswrite(file1,transpose(1:NM),'NPV Vehículos Mercado','A2');
    xlswrite(file1,transpose(npv(:,:)),'NPV Vehículos Mercado','B2');
end

fprintf('Simulación terminada. \n');
```

7.2 Manual de usuario – Español

7.2.1 Objetivo de la herramienta

El objetivo del proyecto es poder guiar a las empresas a gestionar el reemplazo de su flota de vehículos para poder cumplir con las restricciones de reducción de emisiones marcadas por el estado o la propia empresa. Para ello, se ha creado una herramienta que es capaz de encontrar la solución con el menor gasto posible para la empresa que haga cumplir con la reducción de emisiones.

7.2.2 Definición de la herramienta

La herramienta desarrollada está escrita en el lenguaje informático M, mediante el programa Matlab. Con el fin de facilitar la interacción entre el usuario y la herramienta, se ha desarrollado una interfaz donde el usuario se comunicará con la herramienta por Excel y no tendrá que saber utilizar Matlab. Además, el usuario no hará falta tener instalado el programa informático para poder realizar simulaciones, ya que se ha desarrollado un programa ejecutable para instalarlo en el ordenador.

7.2.3 Instalación de la herramienta

El paquete de instalación y uso se compone de 2 archivos: el instalador del programa ejecutable y el fichero Excel. Sin alguno de estos dos archivos no se podrá realizar la simulación de la herramienta.

El instalador del programa ejecutable se llama “MyAppInstaller_web” como se puede ver más en la imagen de más abajo. Haciendo doble clic sobre el archivo, el ordenador le preguntará si desea permitir que la aplicación haga cambios en el equipo a lo que se debe responder si para instalarla en el ordenador.


Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
 MyAppInstaller_web	26/08/2021 17:25	Aplicación	2.638 KB

Ilustración 14: Instalador del programa ejecutable

Cuando realice este paso, se abrirá una ventana donde se le informa de las características de la aplicación y datos de contacto del autor. Es importante entender que queda totalmente prohibido cualquier acción comercial con esta herramienta. Una vez leída la información se da a “Next” para pasar a la siguiente pantalla.

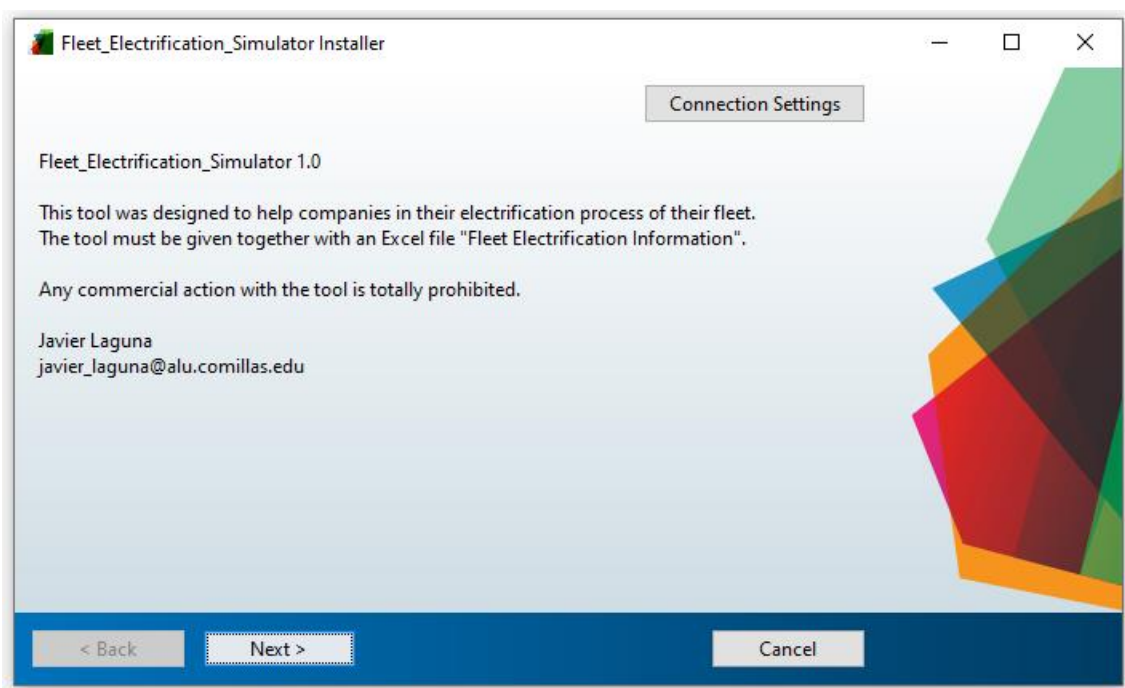


Ilustración 15: Instalación del programa ejecutable

En la siguiente pantalla se elige en qué lugar de su ordenador desea guardar el programa ejecutable. Además, el programa permite añadir un icono al escritorio para poder ser más fácil ejecutar la herramienta. Esto es muy recomendable para no perder el rastro de la herramienta. Una vez dado a “Next” se instalará el programa ejecutable en el ordenador del usuario y un acceso directo desde el escritorio como el que se puede ver a continuación.



Ilustración 16: Acceso directo del programa ejecutable

Es importante que, cuando se haya instalado la herramienta, el acceso directo desde donde se ejecuta el programa y el Excel se encuentren en la misma carpeta. Si esto no se hace, el programa no podrá leer el archivo Excel. La recomendación es instalar el acceso directo en el escritorio y poner el Excel en el escritorio.

Por otro lado, debe de tener un archivo Excel llamado “Fleet Electrification Information” que deberá estar en la misma carpeta que el acceso directo de la herramienta. Este archivo contendrá la información introducida por el usuario acerca de los vehículos de la flota, coches en el mercado, parámetros de estudio e informes a generar.

7.2.4 Instrucciones de uso

En primer lugar, el usuario deberá introducir los datos de entrada que posteriormente utilizará la herramienta en la simulación. Esta información se ha de introducir en el fichero Excel llamado “Fleet Electrification Information” el cual tiene 4 pestañas:

- **Current Fleet Information:** información de la flota actual de la empresa como la categoría del vehículo (tamaño y ruta definido en la hoja de Parameters), año de matriculación, kilómetros y consumo. Además hay que indicar si el vehículo está alquilado o fue comprado.
- **Market Vehicles Information:** información relativa a los vehículos disponibles en el mercado que son candidatos a incorporarse a la flota. El usuario deberá introducir distintos datos como el tamaño, tipo de ruta, si es para comprar o alquilar, los años en los que se amortiza y distintos valores económicos con impuestos incluidos de los vehículos. Es importante que por lo menos haya un vehículo en el mercado por cada tipo de categoría (tamaño y ruta definido en la hoja de Parameters).
- **Parameters:** el usuario deberá definir los parámetros del estudio en las celdas de color blanco de la hoja Excel:
 - Coeficiente para km: valor entre 0 y 1 que se le da a los kilómetros acumulados para el reemplazo de un vehículo en la flota de la empresa.
 - Coeficiente para edad: valor entre 0 y 1 que se le da a la edad para el reemplazo de un vehículo en la flota de la empresa.
 - Tasa de reemplazo compra: tasa de reemplazo de vehículos que la empresa desea retirar cada año del estudio. Tiene que ser un porcentaje menor que el 100%.
 - Años Estudio: duración que se quiere realizar el estudio. Al final de los años del estudio es cuando se deberá cumplir la reducción de emisiones introducida por el usuario.
 - Precio electricidad: precio que la empresa paga por la electricidad en €/kWh.
 - Precio diésel: precio que la empresa paga por el diésel en €/litro.
 - Emisiones CO₂: emisiones que emiten los vehículos por cada litro de diésel consumido. Un valor aceptable es 2,65 kg CO₂ / litro.
 - Precio emisiones: precio ficticio que la empresa da a la producción de emisiones en € / tn CO₂. Si la empresa decide no tener este precio, se ha de poner 0.
 - Cambio en el IPC: tasa de inflación del país en el que opera la empresa. Debe ser un porcentaje.
 - Impuestos: impuesto sobre el valor añadido del país donde opera la empresa. Debe ser un porcentaje.
 - Tasa de retorno (WACC): tasa de retorno que tiene fijada la empresa (WACC). Debe de ser un porcentaje.
 - Objetivo de reducción de emisiones de CO₂: objetivo que se ha marcado la empresa o el gobierno para cumplir al final de los años del estudio. Debe ser un porcentaje.
 - Años alquiler: años que duran los contratos de alquiler en la empresa.

- Kilómetros máximos alquiler: los kilómetros máximos que puede hacer un vehículo en el periodo de alquiler.
- Modo de simulación: el usuario puede elegir entre dos tipos de simulación:
 - Reducción necesariamente mayor al objetivo: la solución óptima será la que tenga el menor NPV teniendo siempre una reducción de emisiones mayor que el objetivo.
 - Reducción más cercana al objetivo: la solución óptima será la que tenga el menor NPV y esté más cerca del objetivo de reducción de emisiones.
- Tipo de Rutas: el usuario deberá definir las rutas en las que está dividida la flota. Se pueden introducir tantas como se quieran mientras que sean números enteros mayores que 0. Los vehículos de la flota actual y del mercado deben tener una ruta que esté definida aquí por el usuario.
- Tamaño del Vehículo: el usuario deberá definir los tamaños en las que está dividida la flota. Se pueden introducir tantas como se quieran utilizando solo una palabra y sin ningún número. Los vehículos de la flota actual y del mercado deben tener un tamaño que esté definida aquí por el usuario.
- Identificadores nuevos: el usuario tendrá que añadir la lista de identificadores que se irán poniendo por orden a los vehículos que se incorporan a la flota. Es recomendable poner muchos más de los que se necesitan ya que, si la herramienta se queda sin números, dará un error.
- Reports: en esta hoja el usuario indicará que informes desea obtener como resultado de la simulación:
 - Informe detallado del NPV de cada vehículo, año y estudio.
 - Informe detallado de las partículas emitidas cada año y en total del estudio, así como la reducción total de emisiones.
 - Informe de la variación de identificadores de los vehículos de la flota a lo largo del estudio.
 - Informe de la variación de la edad de los vehículos de la flota a lo largo del estudio.
 - Informe de la variación de kilómetros de los vehículos de la flota a lo largo del estudio.
 - Informe de la variación de emisiones de los vehículos de la flota a lo largo del estudio.
 - Análisis económico detallado de los vehículos que se introducen en la flota en cada año del estudio.
 - NPV de los vehículos del mercado.

Es importante que no se deje ninguna celda del Excel sin rellenar ya que esto podría provocar algún fallo en la simulación. Por ejemplo, si un vehículo del mercado no tiene subsidios es necesario poner 0 en lugar de dejarlo en blanco.

El usuario no debe de cambiar de nombre el fichero Excel ni el nombre de las hojas del fichero para el correcto funcionamiento de la herramienta.

Una vez el usuario ha introducido los datos requeridos y ha guardado el archivo Excel en la misma carpeta del acceso directo del programa ejecutable, el usuario puede abrir el programa ejecutable “Fleet_Electrification_Simulator”. Una vez se haya clicado el archivo, aparecerá una ventana donde se indicará en qué etapa del código se encuentra la simulación. Al final de la simulación se escribe unas líneas repetidas veces que indican que se están escribiendo los resultados. Una vez se escriben todos los resultados, saldrá escrito un mensaje diciendo que la simulación ya ha terminado.

```

Fleet_Electrification_Simulator
Leyendo datos del Excel.
Datos del Excel leídos.
Realizando el análisis económico para el año 2022.
Finalización del análisis económico para el año 2022.
Realizando el análisis económico para el año 2023.
Finalización del análisis económico para el año 2023.
Realizando el análisis económico para el año 2024.
Finalización del análisis económico para el año 2024.
Realizando el análisis económico para el año 2025.
Finalización del análisis económico para el año 2025.
Realizando el análisis económico para el año 2026.
Finalización del análisis económico para el año 2026.
Realizando el análisis económico para el año 2027.
Finalización del análisis económico para el año 2027.
Realizando el análisis económico para el año 2028.
Finalización del análisis económico para el año 2028.
Realizando el análisis económico para el año 2029.
Finalización del análisis económico para el año 2029.
Realizando el análisis económico para el año 2030.
Finalización del análisis económico para el año 2030.
Decidiendo los vehículos a reemplazar.
Vehículos comprados reemplazados en el año 2022:

ans =

    785    784    760    799    927    852

Vehículos alquilados reemplazados en el año 2022:
No hay vehículos alquilados a reemplazar en el año 2022.
Vehículos comprados reemplazados en el año 2023:

ans =

    809    893    772    811    781    882

Vehículos alquilados reemplazados en el año 2023:
No hay vehículos alquilados a reemplazar en el año 2023.
Vehículos comprados reemplazados en el año 2024:

ans =

    793    884    856    900    849    964

Vehículos alquilados reemplazados en el año 2024:

```

Ilustración 17: Ventana de comandos de la herramienta

En unos pocos minutos desde que se ejecuta la herramienta, aparecerán dos gráficas que se irán rellenando con las posibles soluciones del estudio. Al cabo de aproximadamente 5 minutos, aparecerán en la carpeta dos archivos nuevos llamados “Fleet-Electrification-Results” y “Fleet-Electrification-Economic-Results” acompañados de la fecha de la simulación.

Cabe destacar que, en cada simulación, se crea un archivo llamado “Fleet_Electrification_Log_File” en el cual se puede ver en qué etapa del código se encuentra la simulación, si ha habido algún error durante su ejecución o si ya ha terminado la simulación. Este archivo es el mismo que se ve durante la ejecución del programa ejecutable.

7.2.5 Interpretación de los resultados

Cuando la simulación ha terminado hay tres archivos para estudiar los resultados. En primer lugar se encuentran las dos gráficas llamadas “Figura 1” y “Figura 2”. La Figura 1 es información para el autor del código mientras que la Figura 2 sirve para el usuario.

En la Figura 2 se representa en el eje Y el porcentaje de reducción de emisiones y en el eje X el NPV total del estudio en negativo. Cada punto del gráfico representa una iteración que está formada por la combinación de los vehículos a incorporar en la flota cada año. La solución óptima del estudio y de la que se escriben los resultados en el Excel, es la que está marcada con un punto rojo.

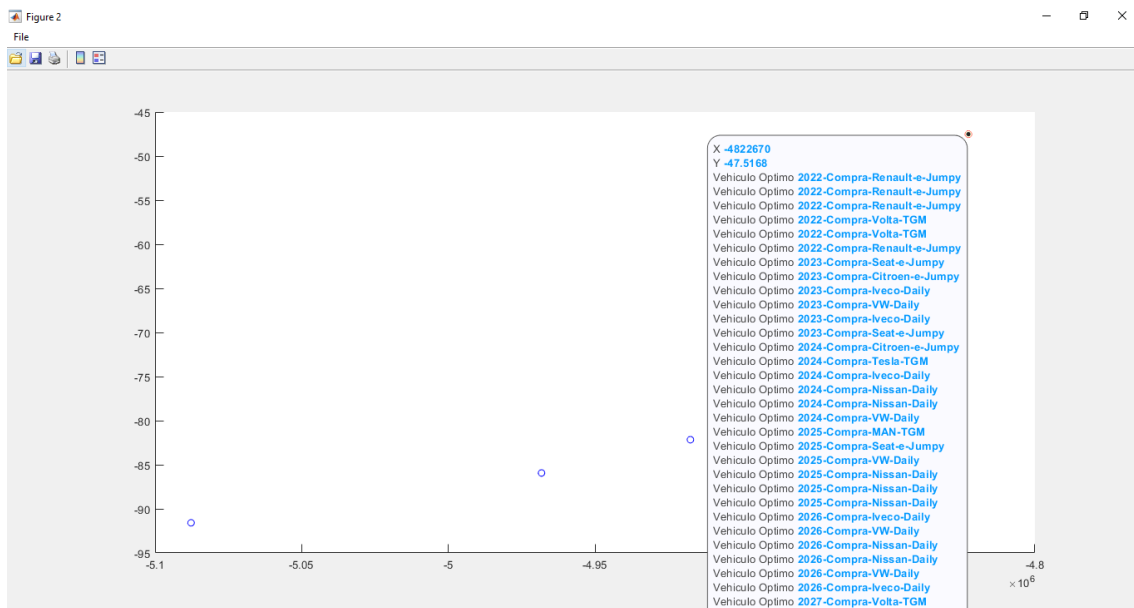


Figura 29: Gráfico de dispersión de las soluciones del estudio

Si se clicla en un punto, se dispone de información más detallada de la solución como el NPV total (X), la reducción total de emisiones (Y) y los vehículos a incorporar a la flota ordenador por año. El usuario puede observar las diferentes soluciones y, en el caso que quiera ver una solución más detallada de alguna de ellas, debería de realizar otra simulación variando el porcentaje de reducción de emisiones objetivos al de la solución que quiere analizar.

La gráfica es una forma rápida de entender en que rangos se mueve la simulación y que resultados puede obtener. Además, se observa como a medida que la reducción de emisiones aumenta, el NPV total necesario se incrementa considerablemente, poniendo en valor el gasto extra que tiene que hacer una empresa con el fin de conseguir el objetivo de reducción de emisiones.

La gráfica se puede guardar para no perder la información puesto que, si se realiza otra simulación, la gráfica desaparecerá y no quedará guardada.

Por otro lado, la herramienta crea dos Excel que pueden contener más o menos información según los informes que haya seleccionado el usuario. Los dos archivos nuevos se crearán en la misma carpeta que los otros archivos y serán llamados “Fleet-Electrification-Results” y “Fleet-Electrification-Economic-Results” acompañados de la fecha de la simulación.



 Fleet-Electrification-Economic-Results-26-8-19-50	26/08/2021 19:54	Hoja de cálculo d...	76 KB
 Fleet-Electrification-Results-26-8-19-50	26/08/2021 19:54	Hoja de cálculo d...	38 KB

Ilustración 18: Ficheros Excel de resultados

El archivo “Fleet-Electrification-Results” tendrá hojas con los años del estudio. En cada hoja se muestra los vehículos que se han de retirar de la flota actual y los que se deben incorporar. Las primeras 4 columnas se refieren a los vehículos que se ha de retirar mientras que las 6 siguientes son resultados del vehículo que se ha de incorporar.

2022
2023
2024
2025
2026
2027
2028
2029
2030
NPV
Reducción Emisiones
Identificadores Vehículos
Edad Vehículos
Kilómetros Acumulados Vehículos
Emisiones Vehículos
NPV Vehículos Mercado

Ilustración 19: Hojas del fichero Excel “Fleet-Electrification-Results”

Otras hojas del primer Excel son las llamadas “NPV” y “Reducción Emisiones” que muestran información de cada año del estudio y del total del estudio en lo referente a lo económico y medioambiental respectivamente.

Las siguientes hojas llamadas “Identificadores Vehículos”, “Edad vehículos”, “Kilómetros Acumulados Vehículos y “Emisiones Vehículos” dan información de la flota completa en cada año del estudio donde se puede ver cómo cambian los identificadores de los vehículos, cómo aumenta la edad y los kilómetros de los vehículos y cuantas emisiones produce cada uno.

La última hoja del primer Excel se llama “NPV Vehículos Mercado” que muestra el NPV de cada vehículo del mercado si se compra o alquila en cada año del estudio.

Por otro lado, se crea otro archivo Excel llamado “Fleet-Electrification-Economic-Results” si el usuario ha querido generar ese informe. En él se muestra de forma detallada el análisis económico de cada vehículo que se incorpora a la flota cada año. Este análisis está basado en un flujo de caja y están representados todos los gastos relativos a ese vehículo.

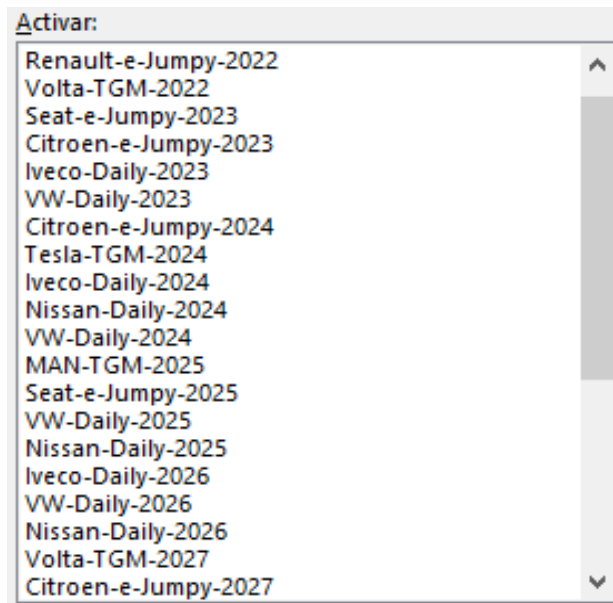


Ilustración 20: Hojas del fichero Excel “Fleet-Electrification-Economic-Results”

7.3 User Manual

7.3.1 Objective of the tool

The objective of the project is to be able to guide companies to manage the replacement of their vehicle fleet in order to comply with the emission reduction restrictions set by the state or the company itself. To this end, a tool has been created that is capable to find the solution with the lowest possible cost for the company to comply with the emission reduction.

7.3.2 Definition of the tool

The developed tool is written in the computer language M, using the Matlab program. In order to facilitate the interaction between the user and the tool, an interface has been developed where the user will communicate with the tool by Excel and will not have to know how to use Matlab. In addition, the user will not need to have the software installed to be able to perform simulations, since an executable program has been developed to be installed on the computer.

7.3.3 Installation of the tool

The installation and use package consists of two files: the installer of the executable program and the Excel file. Without either of these two files, the simulation of the tool cannot be performed.

The executable program installer is called "MyAppInstaller_web" as can be seen in the image below. By double clicking on the file, the computer will ask you if you want to allow the application to make changes on your computer to which you must answer yes to install it on your computer.


Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
 MyAppInstaller_web	26/08/2021 17:25	Aplicación	2.638 KB

Ilustración 21: Instalador del programa ejecutable

When you perform this step, a window will open where you will be informed about the characteristics of the application and the author's contact information. It is important to understand that any commercial action with this tool is totally forbidden. Once the information has been read, click "Next" to go to the next screen.

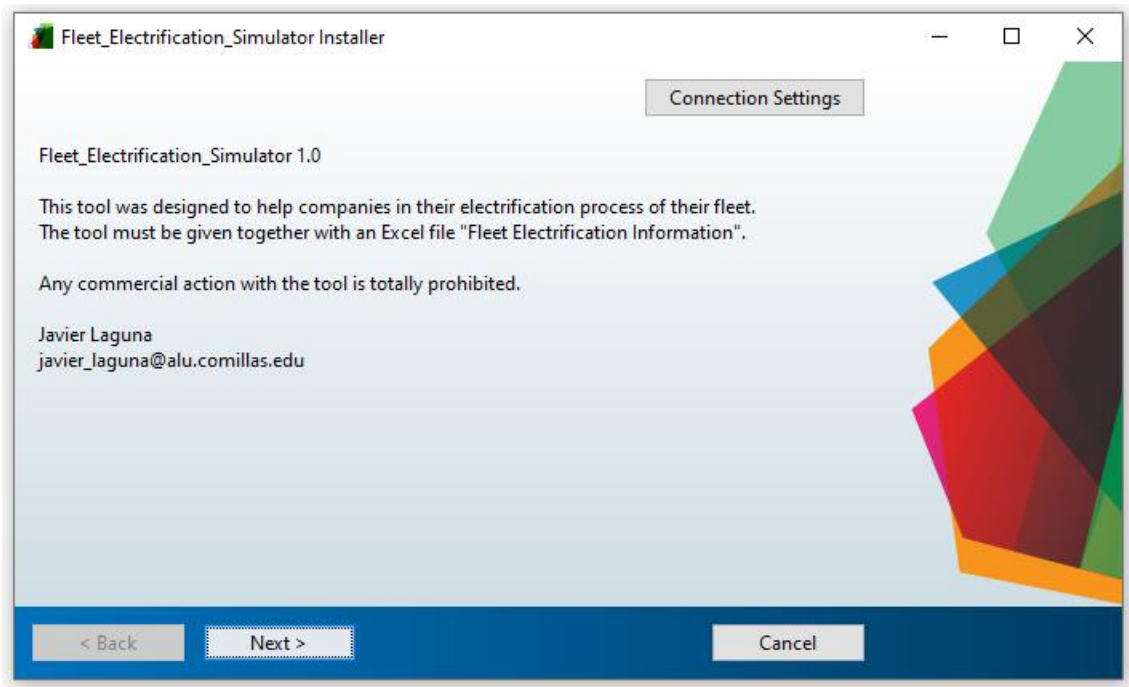


Ilustración 22: Instalación del programa ejecutable

In the next screen, you choose where on your computer you want to save the executable program. In addition, the program allows you to add an icon to the desktop to make it easier to run the tool. This is highly recommended in order not to lose track of the tool. Once "Next" is clicked, the executable program will be installed on the user's computer and a shortcut from the desktop as shown below.



Ilustración 23: Acceso directo del programa ejecutable

It is important that, when the tool has been installed, the shortcut from which the program is run and Excel be in the same folder. If this is not done, the program will not be able to read the Excel file. The recommendation is to install the shortcut on the desktop and put the Excel on the desktop.

On the other hand, you should have an Excel file called "Fleet Electrification Information" which should be in the same folder as the tool shortcut. This file will contain the information entered by the user about the fleet vehicles, cars on the market, study parameters and reports to be generated.

7.3.4 Instructions for use

First, the user must enter the input data to be used later by the tool in the simulation. This information has to be entered in the Excel file called "Fleet Electrification Information" which has 4 tabs:

- **Current Fleet Information:** information on the company's current fleet such as vehicle category (size and route defined in the Parameters sheet), year of registration, kilometers and consumption. It is also necessary to indicate whether the vehicle is leased or purchased.
- **Market Vehicles Information:** information related to the vehicles available on the market that are candidates to join the fleet. The user must enter different data such as size, type of route, whether it is for purchase or lease, the years in which it is amortized and different economic values including taxes of the vehicles. It is important that there is at least one vehicle in the market for each type of category (size and route defined in the Parameters sheet).
- **Parameters:** the user must define the parameters of the study in the white cells of the Excel sheet:
 - Coefficient for km: value between 0 and 1 given to the accumulated kilometers for the replacement of a vehicle in the company's fleet.
 - Coefficient for age: value between 0 and 1 given to the age for the replacement of a vehicle in the company's fleet.
 - Purchase replacement rate: replacement rate of vehicles that the company wishes to retire each year of the study. It has to be a percentage less than 100%.
 - Study years: duration that the study is to be carried out. At the end of the study years is when the emission reduction introduced by the user must be fulfilled.
 - Electricity price: price that the company pays for electricity in €/kWh.
 - Diesel price: price the company pays for diesel in €/liter.
 - CO₂ emissions: emissions emitted by vehicles per liter of diesel consumed. An acceptable value is 2.65 kg CO₂ / liter.
 - Emissions price: fictitious price that the company gives to the production of emissions in € / tn CO₂. If the company decides not to have this price, it should be set to 0.
 - Change in CPI: inflation rate of the country in which the company operates. It must be a percentage.
 - Taxes: value added tax of the country where the company operates. Must be a percentage.
 - Rate of return (WACC): rate of return that the company has set (WACC). Must be a percentage.
 - CO₂ emissions reduction target: target that the company or the government has set itself to meet at the end of the years of the study. Must be a percentage.
 - Lease years: years that the lease contracts last in the company.
 - Maximum rental kilometers: the maximum kilometers that a vehicle can travel during the rental period.
 - Simulation mode: the user can choose between two types of simulation:
 - Reduction necessarily greater than the target: the optimal solution will be the one with the lowest NPV always having an emissions reduction greater than the target.

- Closest reduction to target: the optimal solution will be the one with the lowest NPV and closest to the emission reduction target.
- Type of Routes: the user must define the routes into which the fleet is divided. As many as desired can be entered as long as they are integers greater than 0. The vehicles in the current fleet and in the market must have a route that is defined here by the user.
- Vehicle Size: the user must define the sizes in which the fleet is divided. You can enter as many as you want using only one word and without any number. The vehicles in the current fleet and in the market must have a size that is defined here by the user.
- New identifiers: the user will have to add the list of identifiers that will be put in order to the vehicles that are incorporated to the fleet. It is advisable to add many more than needed because, if the tool runs out of numbers, it will give an error.
- Reports: in this sheet the user will indicate which reports he/she wants to obtain as a result of the simulation:
 - Detailed NPV report for each vehicle, year and study.
 - Detailed report of the particles emitted each year and in total of the study, as well as the total reduction of emissions.
 - Report of the variation of fleet vehicle identifiers over the study period.
 - Report of the variation of the age of the fleet vehicles throughout the study.
 - Report of the variation of kilometers of the vehicles in the fleet throughout the study.
 - Report of the variation of emissions of the fleet vehicles throughout the study.
 - Detailed economic analysis of vehicles entering the fleet in each year of the study.
 - NPV of the vehicles in the market.

It is important that no Excel cells are left unfilled as this could cause the simulation to fail. For example, if a market vehicle has no subsidies it is necessary to put 0 instead of leaving it blank.

The user should not change the name of the Excel file or the name of the sheets in the file for the correct functioning of the tool.

Once the user has entered the required data and saved the Excel file in the same folder as the executable program shortcut, the user can open the executable program "Fleet_Electrification_Simulator". Once the file has been clicked, a window will appear indicating at which stage of the code the simulation is in. At the end of the simulation a few lines are written repeatedly indicating that the results are being written. Once all the results are written, a message will be displayed saying that the simulation is finished.

```

Fleet_Electrification_Simulator
Leyendo datos del Excel.
Datos del Excel leídos.
Realizando el análisis económico para el año 2022.
Finalización del análisis económico para el año 2022.
Realizando el análisis económico para el año 2023.
Finalización del análisis económico para el año 2023.
Realizando el análisis económico para el año 2024.
Finalización del análisis económico para el año 2024.
Realizando el análisis económico para el año 2025.
Finalización del análisis económico para el año 2025.
Realizando el análisis económico para el año 2026.
Finalización del análisis económico para el año 2026.
Realizando el análisis económico para el año 2027.
Finalización del análisis económico para el año 2027.
Realizando el análisis económico para el año 2028.
Finalización del análisis económico para el año 2028.
Realizando el análisis económico para el año 2029.
Finalización del análisis económico para el año 2029.
Realizando el análisis económico para el año 2030.
Finalización del análisis económico para el año 2030.
Decidiendo los vehículos a reemplazar.
Vehículos comprados reemplazados en el año 2022:

ans =
    785    784    760    799    927    852

Vehículos alquilados reemplazados en el año 2022:
No hay vehículos alquilados a reemplazar en el año 2022.
Vehículos comprados reemplazados en el año 2023:

ans =
    809    893    772    811    781    882

Vehículos alquilados reemplazados en el año 2023:
No hay vehículos alquilados a reemplazar en el año 2023.
Vehículos comprados reemplazados en el año 2024:

ans =
    793    884    856    900    849    964

Vehículos alquilados reemplazados en el año 2024:

```

Ilustración 24: Ventana de comandos de la herramienta

Within a few minutes of running the tool, two graphs will appear and will be populated with the possible solutions of the study. After about 5 minutes, two new files named "Fleet-Electrification-Results" and "Fleet-Electrification-Economic-Results" will appear in the folder along with the date of the simulation.

It should be noted that, in each simulation, a file called "Fleet_Electrification_Log_File" is created in which you can see in which stage of the code the simulation is in, if there has been any error during its execution or if the simulation has already finished. This file is the same file that is seen during the execution of the executable program.

7.3.5 Interpretation of the results

When the simulation has finished there are three files to study the results. First are the two graphs called "Figure 1" and "Figure 2". Figure 1 is information for the author of the code while Figure 2 is for the user.

Figure 2 represents on the Y-axis the percentage of emission reduction and on the X-axis the total NPV of the study in negative. Each point on the graph represents an iteration that is formed by the combination of vehicles to be incorporated into the fleet each year. The optimal solution of the study and the one for which the results are written in Excel is the one marked with a red dot.

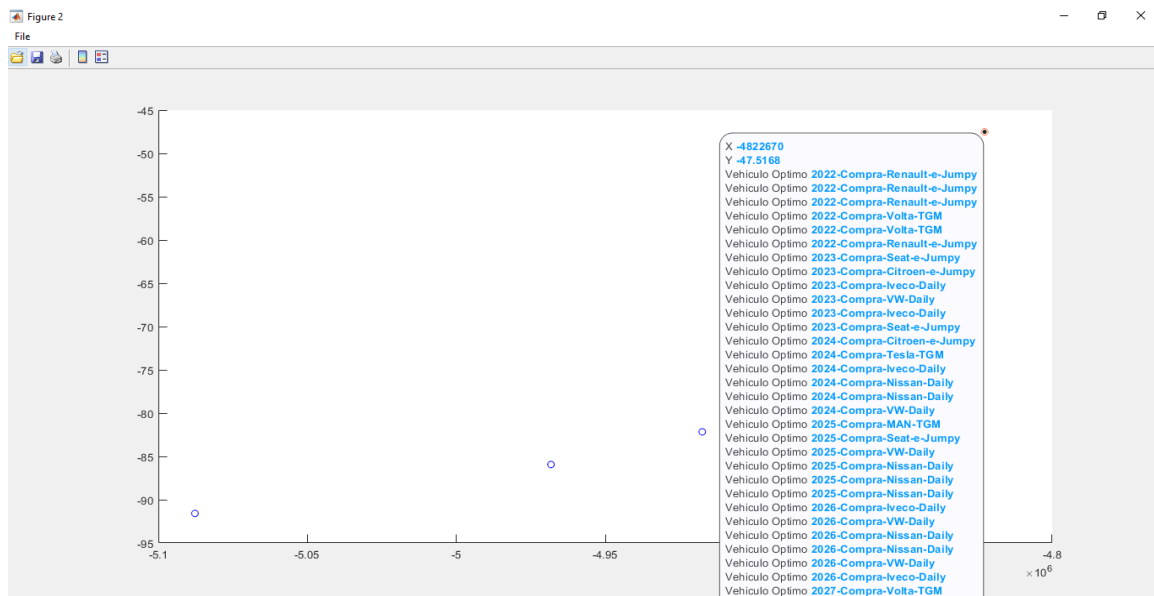


Figura 30: Gráfico de dispersión de las soluciones del estudio

Clicking on a point provides more detailed information on the solution such as the total NPV (X), the total emission reduction (Y) and the vehicles to be added to the computer fleet per year. The user can observe the different solutions and, in case he/she wants to see a more detailed solution of any of them, he/she should perform another simulation varying the percentage of emission reduction targets to the one of the solution he/she wants to analyze.

The graph is a quick way to understand in which ranges the simulation moves and what results can be obtained. In addition, it shows how as the emission reduction increases, the total NPV required increases considerably, putting in value the extra expenditure that a company has to make in order to achieve the emission reduction target.

The graph can be saved so as not to lose the information since, if another simulation is performed, the graph will disappear and will not be saved.

On the other hand, the tool creates two Excel files that can contain more or less information depending on the reports selected by the user. The two new files will be created in the same folder as the other files and will be named "Fleet-Electrification-Results" and "Fleet-Electrification-Economic-Results" together with the date of the simulation.



 Fleet-Electrification-Economic-Results-26-8-19-50	26/08/2021 19:54	Hoja de cálculo d...	76 KB
 Fleet-Electrification-Results-26-8-19-50	26/08/2021 19:54	Hoja de cálculo d...	38 KB

Ilustración 25: Ficheros Excel de resultados

The "Fleet-Electrification-Results" file will have sheets with the years of the study. Each sheet shows the vehicles to be removed from the current fleet and those to be added. The first 4 columns refer to the vehicles to be removed while the next 6 columns are results of the vehicle to be incorporated.

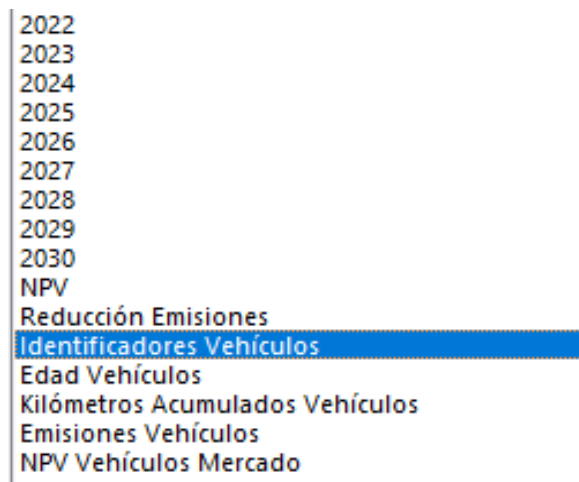


Ilustración 26: Hojas del fichero Excel "Fleet.-Electrification-Results"

Other sheets of the first Excel are called "NPV" and "Emission Reduction" which show information for each year of the study and the total study in terms of economic and environmental respectively.

The following sheets called "Vehicle Identifiers", "Vehicle Age", "Accumulated Vehicle Kilometers" and "Vehicle Emissions" give information on the entire fleet in each year of the study where you can see how the vehicle identifiers change, how the age and kilometers of the vehicles increase and how many emissions each one produces.

The last sheet of the first Excel is called "NPV Market Vehicles" which shows the NPV of each vehicle in the market whether it is purchased or leased in each year of the study.

On the other hand, another Excel file called "Fleet-Electrification-Economic-Results" is created if the user wanted to generate such a report. It shows in detail the economic analysis of each vehicle that joins the fleet each year. This analysis is based on a cash flow and all the expenses related to that vehicle are represented.

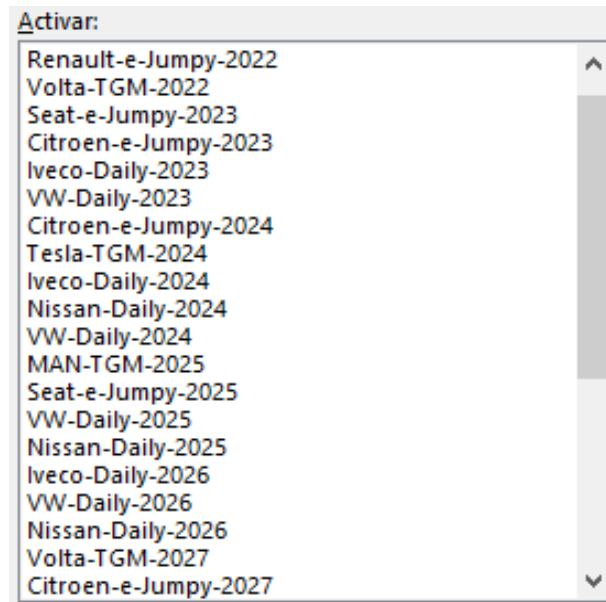


Ilustración 27: Hojas del fichero Excel "Fleet-Electrification-Economic-Results"