



---

**Universidad de Valladolid**

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE SISTEMAS Y AUTOMÁTICAS

TESIS DOCTORAL:

**ANÁLISIS DE FACTORES ECONÓMICOS, TECNOLÓGICOS Y POLÍTICOS  
EN EL FUTURO MERCADO DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO EN ESPAÑA  
MEDIANTE DINÁMICA DE SISTEMAS**

Presentada por Israel García García para optar al grado de  
doctor por la Universidad de Valladolid

Dirigida por:  
Dr. Luis Javier de Miguel González



# Índice general

<b>Índice general .....</b>	<b>i</b>
<b>Capítulo 1. Introducción y justificación.....</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción .....	1
1.2. Motivación y justificación .....	2
1.3. Distribución de la tesis .....	10
1.4. Consideraciones .....	11
<b>Capítulo 2. Objetivos de la tesis.....</b>	<b>13</b>
<b>Capítulo 3. Estado del arte.....</b>	<b>17</b>
<b>Capítulo 4. Metodología de trabajo.....</b>	<b>21</b>
<b>Capítulo 5. Descripción y justificación del modelo.....</b>	<b>29</b>
5.1. Descripción del modelo general.....	29
5.2. Bloque de fabricación del vehículo eléctrico .....	32
5.3. Bloque de evolución de las tecnologías .....	36
5.4. Bloque de costes del vehículo eléctrico .....	73
5.5. Bloque de atractivo del vehículo eléctrico .....	114
5.6. Bloque de demanda del vehículo eléctrico.....	155
5.7. Bloque del medio ambiente .....	162
5.8. Bloque de decisiones del Gobierno.....	189

<b>Capítulo 6. Modelo de motocicletas eléctricas .....</b>	<b>197</b>
6.1. Modelo general de las motocicletas .....	203
6.2. Bloque de fabricación de la motocicleta eléctrica .....	206
6.3. Bloque de evolución de las tecnologías .....	208
6.4. Bloque del coste de la motocicleta eléctrica.....	213
6.5. Bloque de atractivo de la motocicleta eléctrica.....	223
6.6. Bloque de demanda de la motocicleta eléctrica.....	236
6.7. Bloque de decisiones del Gobierno.....	239
<b>Capítulo 7. Principales diferencias del modelo del año 2010 frente al modelo del año 2013 .....</b>	<b>241</b>
<b>Capítulo 8. Simulación de escenarios y resultados .....</b>	<b>245</b>
8.1. Análisis de sensibilidad .....	247
8.2. Escenario base .....	254
8.3. Escenarios de evolución de la capacidad de la batería .....	259
8.4. Escenarios de evolución del coste de la batería.....	275
8.5. Escenarios de evolución de la implantación de estaciones de intercambio de baterías.....	287
8.6. Escenarios de evolución del números de puntos de carga .....	297
8.7. Escenarios de evolución de las subvenciones .....	299
8.8. Escenarios de evolución del precio del petróleo.....	308
8.9. Escenarios de evolución del precio de la electricidad .....	311
8.10. Escenarios de evolución del mix eléctrico .....	312
8.11. Escenarios optimistas y pesimistas globales .....	316
8.12. Escenarios de evolución d las motocicletas eléctricas .....	325
<b>Capítulo 9. Conclusiones.....</b>	<b>339</b>
9.1. Conclusiones .....	339
9.2. Futuras líneas de investigación .....	346

**Capítulo 10. Referencias bibliográficas..... 347**

**Capítulo 11. Anexo I: Ecuaciones del modelo..... 369**

**Capítulo 12. Anexo II: Diagramas del modelo..... 397**



# Capítulo 1

## Introducción y justificación

### 1.1 Introducción

El sector del transporte es responsable de una parte muy significativa y creciente de las emisiones de CO<sub>2</sub> globales. En el año 2010, el sector del transporte consumió aproximadamente el 38% de la energía total empleada en España [Industria11]. Dentro de éste, el transporte por carretera, sigue teniendo una gran dependencia de los combustibles de origen petrolífero (aproximadamente un 98%) y por tanto es muy vulnerable a posibles fluctuaciones de los precios del petróleo y a las interrupciones de su suministro.

El sector del transporte, emite más del 25% de las emisiones de CO<sub>2</sub> en España, siendo el transporte por carretera el responsable del 90% de las emisiones de CO<sub>2</sub> de dicho sector, con un consumo energético del 80% del sector [Idae09b].

A la vista de los datos, parece necesario un proceso de cambio en el sector automovilístico que implique una reducción tanto en las emisiones de CO<sub>2</sub>, como en la reducción del consumo energético de los vehículos que circulen por nuestro país. Ello está alineado con las recomendaciones del IPCC (Inter-governmental Panel on Climate Change) a nivel internacional, que indican que las emisiones globales de CO<sub>2</sub> deben ser

reducidas entre un 50% y un 85% en el año 2050 a fin de evitar que el calentamiento global supere el umbral de temperatura de 2° C [Christensen12]. Este objetivo de reducción implica que los países desarrollados necesitan reducir sus emisiones entre un 80% y un 90% en 2050 [European11a]

Para ello, los Gobiernos de los diferentes países, y entre ellos el de España, han comenzado a desarrollar estrategias para impulsar este cambio, entre las cuales se encuentra la promoción de tecnologías de propulsión alternativas a las convencionales. En el caso de España, se ha desarrollado la denominada “Estrategia Integral para el impulso del vehículo eléctrico en España” [Industria10b], que integra planes de acción para los años comprendidos entre 2010 y 2014. Esto se ha dividido en dos planes de acción bianuales siendo el comprendido entre el año 2010 y 2012 el denominado proyecto MOVELE en el cual se han concretado y pormenorizado una serie de líneas de acción.

Las estrategias y planes del gobierno español han sufrido en cualquier caso alteraciones significativas como consecuencia de la situación económica de los últimos años, pero se mantiene la problemática planteada y la necesidad de buscar soluciones.

En este contexto, el trabajo de investigación que ha conducido a este tesis doctoral ha pretendido aportar un análisis de los factores más determinantes que puedan afectar al futuro desarrollo del mercado de vehículos eléctricos en España, con el objetivo último de contribuir a la toma óptima de decisiones en los ámbitos privado y público.

## **1.2 Motivación y justificación**

El suministro de energía para el sector del transporte puede tener un gran número de vías como se muestra en la siguiente figura. En dicha figura también se pueden ver los sectores que compiten por las mismas fuentes de energía primarias como la industria y los hogares. Por lo tanto, la evaluación de las necesidades futuras de energía en el sector transporte y sus recursos potenciales, tienen que incorporar una reflexión más general sobre el consumo total de energía y sus usos potenciales.

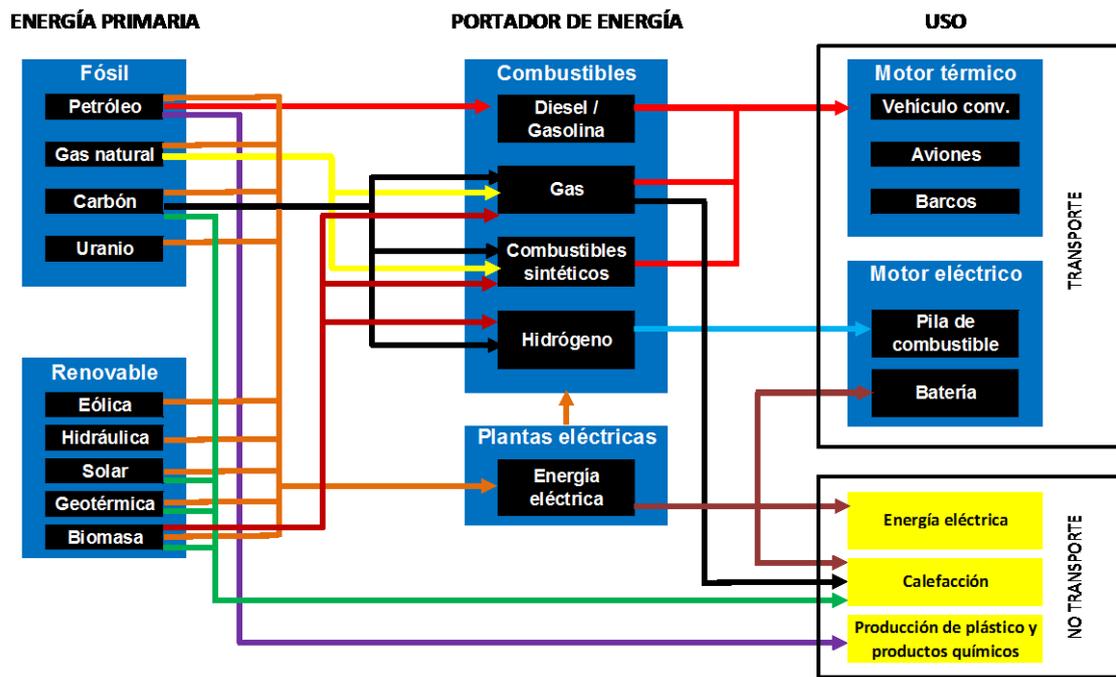


Figura 1: Caminos de la energía en el sector transporte y en otros sectores [European11b].

Dentro de las diferentes líneas de trabajo para conseguir el cambio en el sector automovilístico, la que parece estar adquiriendo un mayor peso específico es el vehículo eléctrico.

La denominada movilidad eléctrica, como nueva tecnología tiene el potencial para conseguir reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y contribuir a la transición del actual sistema de transporte, a un sistema mejor medioambientalmente hablando.

El vehículo eléctrico se define como aquel vehículo propulsado parcial o totalmente por energía eléctrica procedente de baterías que se recargan en la red eléctrica. Según esta definición, van a existir tres familias de vehículos eléctricos [Industria10b]:

- Vehículo híbrido eléctrico enchufable (PHEV): Este tipo de vehículo combina un motor de combustión interna con una batería y un motor eléctrico, ambos en una configuración en paralelo.
- Vehículo eléctrico de batería (BEV): Estos vehículos están propulsados únicamente por un motor eléctrico. La fuente de energía proviene de la

electricidad almacenada en la batería que se debe cargar a través de la red.

- Vehículo eléctrico de autonomía extendida (EREV): Poseen las mismas características que los vehículos eléctricos de batería pero llevan además un motor de combustión interna como fuente secundaria de energía, que funciona como un generador interno que recarga las baterías permitiendo aumentar la autonomía del vehículo.

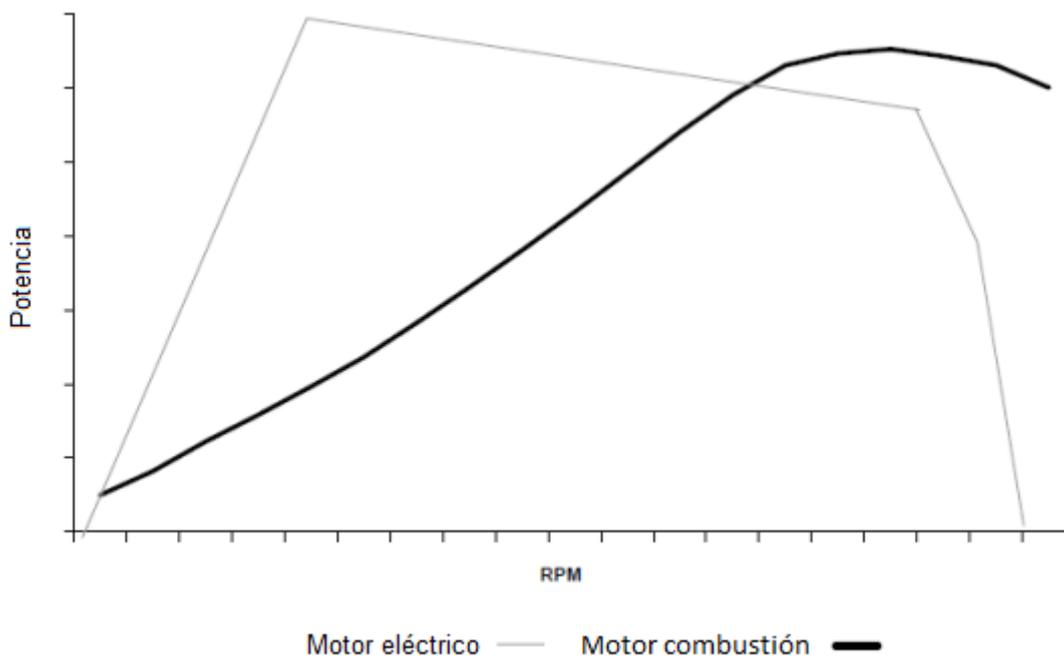
En el vehículo eléctrico no se ha considerado el vehículo híbrido eléctrico (HEV), puesto que no se ajusta a la definición anteriormente descrita, ya que por sus características utilizan únicamente como fuente energética el combustible, y no necesariamente permite la carga de la batería por una fuente exterior de electricidad.

Dentro de estos tres tipos de vehículo eléctrico, esta tesis se ha realizado para el caso del vehículo eléctrico de batería (BEV) única y exclusivamente. Esto es debido a que se pretende realizar un estudio sobre un vehículo con total independencia del petróleo. Asimismo, los fabricantes automovilísticos mundiales más importantes parece que están optando fuertemente por este tipo de vehículos, frente a los otros. Esto se desprende de las estrategias comerciales que presenta cada constructor. La gran mayoría de los principales fabricantes de automóviles tienen algún modelo ya a la venta de vehículos eléctricos de batería como son el Peugeot iOn, el Citroën c-Zero, el Mitsubishi i-MiEV, los diferentes modelos de Renault (Fluence, Zoe, Kangoo, Twizy), el Nissan Leaf, o lo tienen planificado para próximas fechas como por ejemplo el Fiat 500e, el Ford Focus Electric, etc. Sin embargo, en las otras dos categorías definidas anteriormente los fabricantes no han desplegado tantas políticas comerciales a excepción de ciertos ejemplos como el del Opel Ampera, etc. Por ello, en lo sucesivo de este trabajo, el vehículo eléctrico de batería será denominado vehículo eléctrico.

Una vez se ha explicado claramente el concepto de vehículo eléctrico, se ha de justificar el porqué de la elección de este tipo de tecnología frente a la convencional de combustión interna.

El primer concepto clave es la eficiencia energética. El motor eléctrico es energéticamente más eficiente que el motor de combustión interna, pese a que en los últimos años se han realizado avances muy importantes en cuanto al rendimiento de este

último [Smith10]. En la siguiente figura se pueden observar las curvas de rendimiento de ambos motores. El motor eléctrico es capaz de suministrar un elevado par al comienzo, con una eficiencia relativamente elevada hasta altas velocidades.



**Figura 2: Comparativa entre la eficiencia del motor eléctrico y el de combustión interna [Deutsche08].**

El motor de combustión interna tiene una velocidad de rotación mínima a la que puede suministrar potencia en el eje. Incluso a esta mínima velocidad, la potencia que se debe suministrar al eje para superar la fricción interna en el motor es normalmente del orden de 5 kW [Smith10], y este requisito aumenta con la velocidad de rotación. Además, la forma de la curva de par-velocidad para el motor de combustión interna requiere el uso de una caja de cambios con el fin de mantener rendimientos aceptables a través de una amplia gama de velocidades del vehículo. El resultado general es que la velocidad del motor en general no se correlaciona con la velocidad del vehículo. Por lo tanto, cuando la velocidad del vehículo es baja, la eficiencia mecánica del motor de combustión interna es generalmente muy pobre.

La eficiencia general del motor es un producto de su eficiencia mecánica y su eficiencia termodinámica. La eficiencia general del motor por lo tanto variará de aproximadamente 40% en el punto de funcionamiento óptimo a 0% en ralentí. Cuando

se arranca en frío, el déficit de la eficiencia del motor de combustión interna es aún mayor. Los motores de gasolina requieren un enriquecimiento de la mezcla empleada para alcanzar un funcionamiento aceptable. Todos los vehículos convencionales también sufren la mayor viscosidad del aceite lubricante a bajas temperaturas, lo que aumentan las pérdidas por fricción en el motor y la transmisión de un arranque en frío.

Las características anteriores están en contraste con las de los motores eléctricos, que tienen un alto grado de eficiencia global (entre un 70% y un 90%) en la mayor parte de los mapas de la velocidad y de carga, y puede entregar par máximo a velocidad cero del eje [Ahman01]. Esta última característica evita la necesidad de una caja de cambios, de modo que un vehículo eléctrico puede mantener una alta eficiencia mecánica a velocidad de carretera cero. Las pérdidas termodinámicas del vehículo eléctrico se asocian principalmente con la generación y la transmisión de la electricidad que se utiliza para accionar el motor. Por lo tanto, la eficiencia global de los vehículos eléctricos dependerá de la eficiencia del sistema de generación y transmisión de la electricidad, así como del motor.

Según esto, para realizar un análisis de eficiencia de los distintos tipos de vehículos, se debe estudiar la eficiencia en la fase del ciclo de vida comparable. Para ello, se ha considerado el rendimiento denominado *Well-To-Wheel* (del pozo a la rueda), es decir desde que se obtiene la energía hasta que se ha generado el movimiento. En el caso del motor de combustión interna, en el mejor de los casos, se obtiene un rendimiento que no llega al 20%, mientras que el vehículo eléctrico con la energía eléctrica proveniente del mix del año 2012 se acerca al 30% [Bandivadekar08], [Granovskii06].

De lo mencionado anteriormente, y sin entrar al estudio que se hará posteriormente, se puede concluir que el vehículo eléctrico ofrece beneficios muy significativos en un contexto urbano, es decir con velocidades bajas del vehículo, bajos requisitos de potencia y viajes cortos.

Continuando con aspectos energéticos, la carga del vehículo eléctrico en la red en horario nocturno, es muy beneficiosa, puesto que fomenta la incorporación de las energías renovables, y consigue aplanar la curva de la demanda, lo que favorece el rendimiento global.

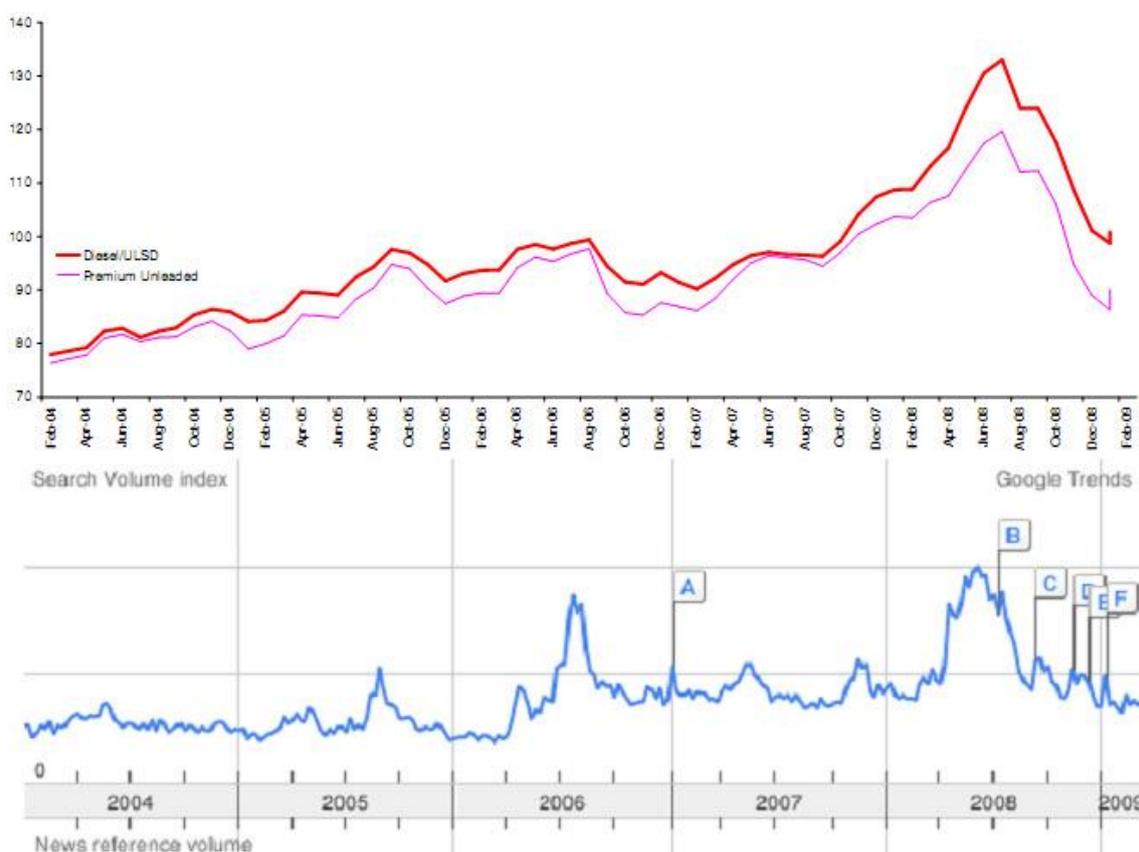
El segundo concepto clave en el que el vehículo eléctrico influye de manera determinante es en las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. El vehículo eléctrico no genera ningún tipo de emisiones contaminantes de forma directa durante su utilización, debido al motor eléctrico. No obstante, el vehículo eléctrico no va a estar exento de emisiones como tal. Existirán ciertas emisiones a computar, dependiendo de dónde proceda la energía eléctrica que esté consumiendo. Estas emisiones se generarán en la fase *Well-To-Tank* (del pozo al tanque) y dependerán del mix energético. Según esto, para que el vehículo eléctrico no genere emisiones de ningún tipo durante su utilización, es necesario que la electricidad provenga de fuentes sin emisiones de CO<sub>2</sub> como son las energías renovables. Adicionalmente habría que valorar en el ciclo de vida completo de vehículo eléctrico las emisiones generadas en la fabricación del vehículo, las operaciones de mantenimiento durante su vida útil y finalmente su tratamiento como residuo al final de la misma. Este cálculo quedará fuera del alcance de este trabajo.

Atendiendo a la industria de automoción, una clara tendencia tecnológica de la misma es la progresiva electrificación del llamado *drive train* o tren de potencia del mismo, así como de otros elementos auxiliares, siendo en estos momentos una realidad la tecnología híbrida en el mercado. Sin esta electrificación progresiva a los fabricantes de automóviles les resultará muy difícil cumplir los distintos objetivos planteados por el Reglamento (CE) N° 443/2009 de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> para los vehículos turismo.

Por último, el tercer aspecto clave es la reducción de la dependencia del petróleo. Uno de los principales problemas que presenta nuestro país es la elevada dependencia energética que tiene del exterior, en especial del petróleo. Con el vehículo eléctrico se reduce drásticamente esta utilización de petróleo, y en consecuencia la dependencia energética del exterior, favoreciendo además el consumo de las fuentes renovables.

El aumento de los precios del petróleo y la creciente preocupación social por el cambio climático, provocó un enfoque renovado en la industria de los vehículos hacia un combustible más eficiente y la electrificación a finales de 2008, sobre todo en Europa. Además, muchos países, regiones y ciudades han fijado impuestos, tasas y otras restricciones a los vehículos menos eficientes o que tengan más emisiones de CO<sub>2</sub>,

proporcionando incentivos para la compra de vehículos más eficientes. Los precios del petróleo han aumentado casi constantemente desde finales de 2001, alcanzando un récord de 147,27 \$ por barril el 11 de julio de 2008, pese a que los máximos en euros se estén localizando en el año 2012, también fomentados por la debilidad de la moneda con respecto al 2008 [Iea13]. Se cree que la caída de los precios desde el final de 2008, debido en gran parte a la crisis económica, es sólo una disminución temporal de los precios y que continuará su trayectoria ascendente a largo plazo. La amenaza del aumento de los precios del petróleo y el aumento de las normativas, una vez más estimula un nuevo interés en los vehículos eléctricos [Efte09]. En la siguiente gráfica se puede observar la correlación entre los precios del petróleo y el interés del público por los vehículos eléctricos.



**Figura 3: Correlación entre los precios del petróleo y el interés del público por los vehículos eléctricos [Efte09].**

A los elevados precios del barril de petróleo hay que añadir que España se encuentra en la denominada categoría 4 (la más alta) en cuanto al precio que tiene la gasolina para el consumidor final como se puede ver en la siguiente gráfica [Giz11].

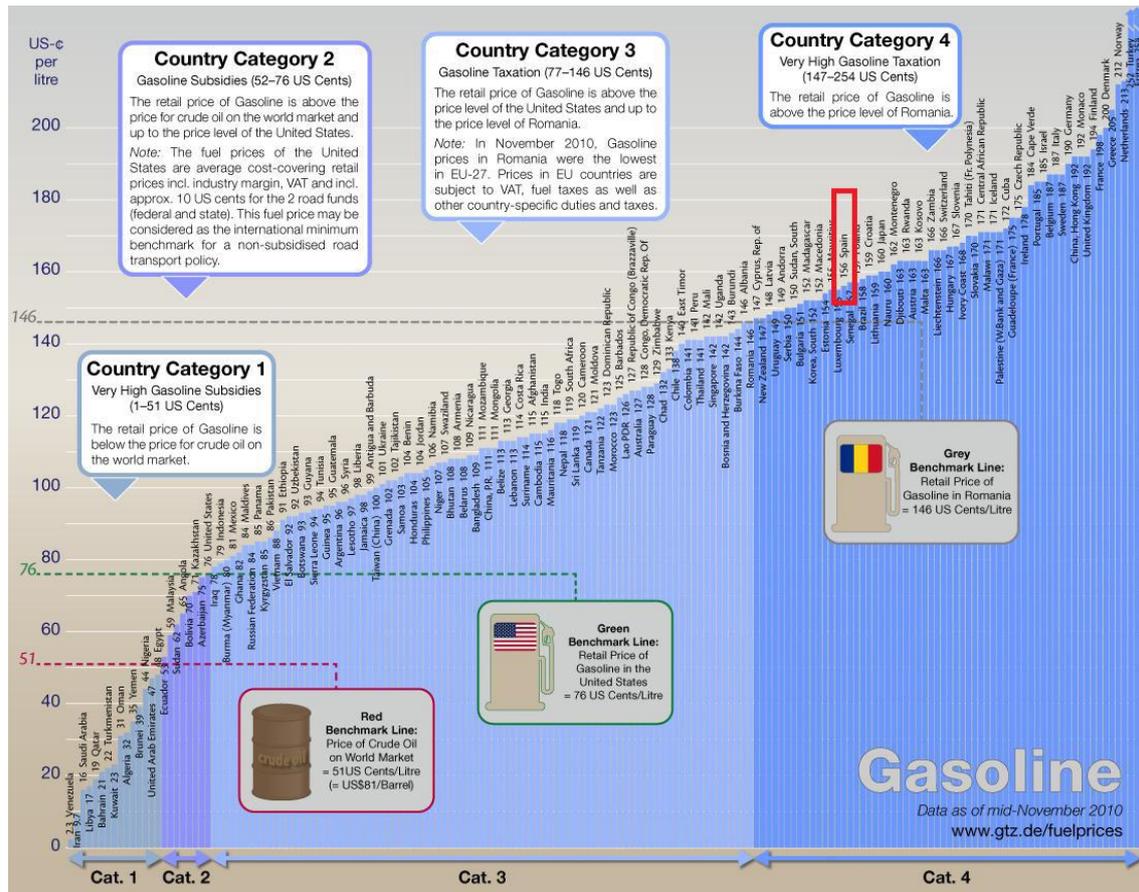


Figura 4: Clasificación de los países en función de los precios de la gasolina [Giz11].

Además de los factores principales anteriormente enunciados, existen otros que también son de relevancia, como son la creación de nuevas oportunidades en el sector industrial, principalmente en el sector de la automoción, pero también en el sector de las tecnologías de la información, y en el de los equipos eléctricos.

Como último dato, resaltar que el vehículo eléctrico no genera contaminación acústica debido al funcionamiento del motor, lo que va a implicar disminuir el nivel de decibelios emitidos por el vehículo en movimiento, mejorando el nivel acústico general de las ciudades.

Todas las ventajas analizadas sólo se convertirán en realidad si la movilidad eléctrica se genera una cuota de mercado significativa, pero esta va a depender de una gran variedad de factores técnicos y socioeconómicos, apareciendo inicialmente como gran obstáculo para el éxito de la misma la batería, debido a sus altos costes y su corta autonomía.

Hablando en términos generales, el vehículo eléctrico actualmente tiene un precio de compra superior y un tiempo de vida más corto que el del vehículo convencional [Walther10]. Los vehículos eléctricos están aún en las primeras fases del proceso de adopción por los consumidores [Train04] y es importante analizar cuáles son las características del vehículo eléctrico que el cliente potencial necesita.

Tal y como se acaba de explicar, el primer freno que el consumidor encuentra es el precio de compra (esencialmente el coste de la batería) descrito en trabajos anteriores a este estudio [Borenstein08]. Sin embargo, el coste es compensado por un inferior precio de la electricidad comparado con el de la gasolina, y un inferior coste de mantenimiento [Werber09].

Como resumen, en la práctica totalidad de los países de nuestro entorno europeo y de la OCDE se están implementando políticas de apoyo al vehículo eléctrico, pues éste mejora la eficiencia energética (contemplando el actual rendimiento de generación del mix español), reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> y de contaminantes en las ciudades y además, permite la reducción de dependencia del petróleo y la utilización de fuentes de energía autóctonas, que en el caso de España implica el aprovechamiento de sus fuentes de generación libres de CO<sub>2</sub>, en especial, de las energías renovables que ya representan el 20% de la generación eléctrica y que en 2020 deberán suponer el 40%.

A la vista de los datos anteriormente descritos, la motivación de esta tesis es el interés de analizar cómo estas ventajas del vehículo eléctrico van a hacer frente a las desventajas existentes y cómo van a interrelacionarse.

### **1.3 Distribución de la tesis**

La tesis consta de 11 capítulos. En este capítulo introductorio se presentan las motivaciones que se encuentran en el origen de este trabajo de tesis, así como la justificación de la elección de esta investigación.

En el segundo capítulo se fijan los objetivos perseguidos durante la investigación llevada a cabo.

El tercer capítulo contiene un estado del arte de la investigación realizada durante el desarrollo de la tesis, así como un detalle de la literatura más significativa encontrada durante la investigación.

El capítulo cuarto explica la metodología empleada para la consecución de los resultados así como una breve reseña histórica de la misma.

El capítulo quinto contiene el modelo completo del vehículo eléctrico desarrollado durante la investigación que será a partir de cuyos resultados simulados se puedan obtener las conclusiones.

En el capítulo sexto se explica pormenorizadamente el modelo que se ha desarrollado para las motocicletas eléctricas.

El capítulo séptimo consta de las principales diferencias cuantitativas y cualitativas de los modelos desarrollados en el año 2010 y 2013 pudiendo observar las grandes variaciones en cuanto a los resultados se refiere.

En el octavo capítulo se encuentran los resultados de las simulaciones en los diferentes escenarios detallados en el mismo capítulo, así como los análisis de sensibilidad realizados para el modelo.

En el noveno capítulo se presentan las conclusiones extraídas del presente trabajo de tesis y las líneas de trabajo futuras abiertas a partir de los resultados obtenidos.

Por último, los capítulos décimo y undécimo contienen la bibliografía empleada en la realización de la tesis y un anexo con la programación del modelo respectivamente.

## **1.4 Consideraciones**

Para no perder rigurosidad, las imágenes de la tesis extraídas de las fuentes han mantenido el formato original, tal y como aparecen en documentos públicos o de acceso público.



## Capítulo 2

# Objetivos de la tesis

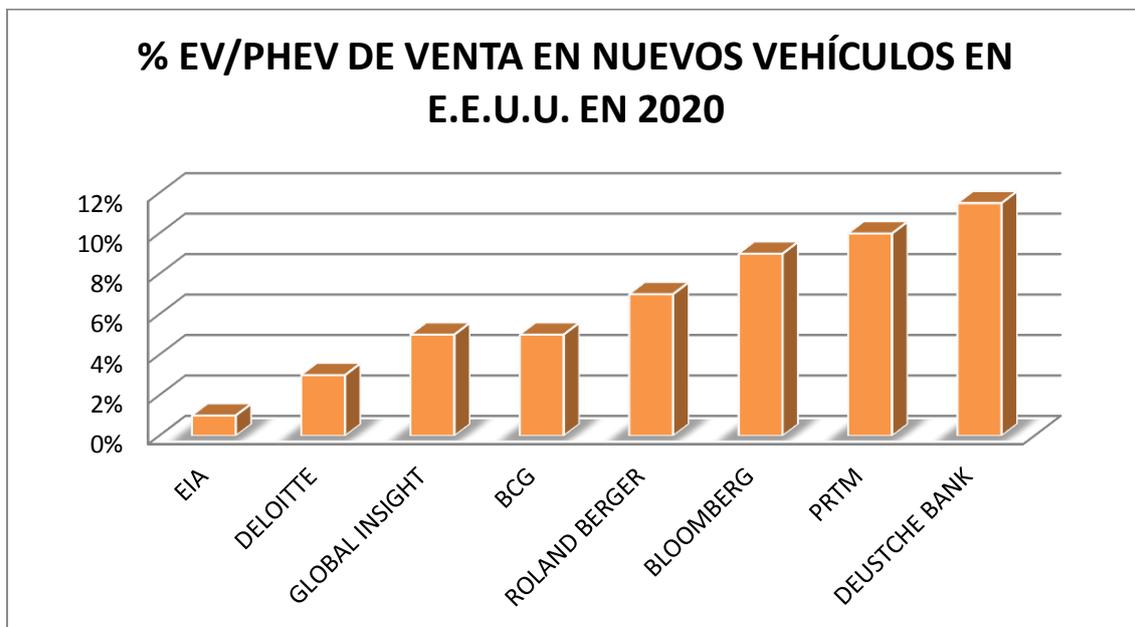
El objetivo general de la tesis será el análisis de las variables más significativas que determinan la evolución del mercado de vehículos eléctricos en España, así como la interacción entre ellas. Este conjunto de variables, sus relaciones y sus dinámicas temporales serán entendidas como un sistema complejo, cuyo modelado constituirá el principal resultado de esta tesis. El fin último de este modelado será facilitar la toma de decisiones políticas y económicas para modificar el comportamiento de este mercado en un sentido u otro según sean las prioridades políticas, sociales o económicas.

Esto se va a lograr mediante la construcción de un modelo en dinámica de sistemas, el cual se va a utilizar para realizar el análisis y la comparación de las diversas variables, que posteriormente estarán descritas, cuánto van a influir y de qué forma, en el número de vehículos eléctricos que van a circular por las carreteras españolas en los próximos años.

Es muy importante resaltar, que con esta tesis no se intenta predecir el futuro, es decir, no se pretende predecir el número de vehículos eléctricos que van a circular en España en el año 2020. El modelado del sistema pretende explicar las interacciones entre todas las variables implicadas, y partiendo de las estimaciones disponibles de cada una de ellas, aproximar el comportamiento del sistema bajo diferentes escenarios. Sin

embargo serán las decisiones humanas, así como el comportamiento real de algunas variables exógenas, lo que determine realmente el futuro. Por ello no puede considerarse esta una herramienta de predicción de futuro sino de ayuda en la toma de decisiones que conduzcan al mejor futuro posible. La complejidad del sistema, dada por las numerosas incertidumbres de variables exógenas, sociales, económicas y tecnológicas hace que los resultados obtenidos sólo puedan interpretarse en términos cualitativos y tengan un escaso valor en términos cuantitativos.

Al ser sistemas muy complejos hay una amplia gama de puntos de vista con respecto a la viabilidad comercial de los vehículos eléctricos, en España y a nivel mundial. Dependiendo del estudio que se analice, los resultados de implantación van a variar muy significativamente. La variación de estas previsiones pueden en gran parte atribuirse a distintos supuestos sobre los precios de los combustible, el ritmo de reducción del costo de la batería, el despliegue de la infraestructura de recarga y la política gubernamental. Según esto, el intentar predecir el número de vehículos que circularán por las carreteras españolas en el 2020 es una tarea casi de imaginación. Como ejemplo se puede ver en la siguiente figura una comparativa de las previsiones de ventas de vehículos eléctricos y eléctricos enchufables en EE.UU. en el año 2020 realizados por diversos estudios.



**Figura 5: Previsión de ventas de vehículos eléctricos y enchufables en EE.UU. en el 2020 según diversos estudios [Electrification10b].**

Los valores varían desde el 1% hasta casi el 12% con lo que se observa claramente que la predicción en la mayoría de los estudios (o incluso en todos) será errónea. Por ello, lo que se pretende con esta tesis es comprender las relaciones de las variables que pueden contribuir a la implantación del vehículo eléctrico en España y no predecir el número de vehículos vendidos.

En grandes líneas, se pueden definir cómo objetivos particulares:

- Estudiar y analizar las diferentes variables que van a tener influencia en el desarrollo del vehículo eléctrico.
- Estudiar la sensibilidad sobre los distintos parámetros influyentes en el vehículo eléctrico.

Obtener las políticas gubernamentales para alcanzar los objetivos fijados en cuanto al número de vehículos eléctricos, atendiendo a los diversos escenarios tecnológicos y económicos a tratar.



## Capítulo 3

# Estado del arte

Hoy en día, existe numerosa literatura que aborda diferentes aspectos de la problemática del vehículo eléctrico. Muchos de ellos comparan los sistemas de propulsión de los vehículos para dilucidar cuales son las opciones reales para un sistema de propulsión sostenible. Muchos de estos estudios emplean alguna forma de análisis de ciclo de vida para considerar tales atributos como la eficiencia energética, emisiones, y sobre todo el costo de combustible y/o la vida del vehículo.

Dentro de toda esta literatura, uno de los trabajos pioneros y a la vez más detallados es “On the Road 2035” [Bandivadekar08] realizado en el MIT. En él se describen de manera pormenorizada las diferentes alternativas al vehículo de combustión interna, así como sus características principales y sus ventajas e inconvenientes. Una parte importante de los trabajos posteriores se basan en este informe. Existen otras instituciones que han desarrollado importantes líneas de investigación en torno al vehículo eléctrico como el “Electric Power Research Institute (EPRI)” [Duvall04], [Graham01], [Neenan10], el “Institute of Transportation Studies” de UC Davis [Kurani08], [Kurani09], el “Department for the Business Enterprise and Regulative Reform (BERR) and Department for Transport (DfT)” [Berr08] y el

“Electrification Coalition” [Electrification09], [Electrification10a] con informes muy concisos y detallados.

Dentro de la numerosa literatura, también existen trabajos muy detallados focalizados en la problemática de las baterías dentro de los cuales destacan los realizados por “Deutsche Bank Securities Inc” [Deutsche08], el trabajo muy detallado de “The Boston Consulting Group” [Boston10], los trabajos de “European Federation for Transport and Environment” [Efte09] y las publicaciones del “European Storage Battery Manufacturers” [Eurobat05], los trabajos de Duvall [Duvall04], [Duvall05] y Anderman [Anderman00], siendo el trabajo de Kromer y Heywood [Kromer07] el punto de partida de numerosos trabajos posteriores, estando considerado como uno de los mejores estudios de baterías para el vehículo eléctrico. Otra fuente de información muy referenciada y utilizada en el campo de las baterías es el “Argonne National Laboratory” [Gaines00] en el que se desglosa los costes y problemática de las baterías de iones de litio. Para facilitar las comparaciones entre diferentes estudios, los investigadores del Argonne National Laboratory han desarrollado modelos para evaluar las emisiones, el uso de energía, y los costos de las tecnologías de transporte dado un conjunto de supuestos.

Mención especial hay que hacer al trabajo de Kalhammer “Status and Prospects for Zero Emissions Vehicle Technology” [Kalhammer07] en el que se realiza una exhaustiva comparación entre los diversos tipos de almacenaje de energía y las necesidades para los vehículos eléctricos.

Por último, la tercera gran temática incluida dentro del vehículo eléctrico, es la relación tan cercana que tiene con el medioambiente. Dentro de esta temática, también existe una literatura muy extensa con numerosos trabajos oficiales y trabajos de investigación. Dentro de los más importantes se encuentran todos los reportes de “European Council for Automotive R&D” [Eucar06], [Eucar07], [Eucar08a], [Eucar08b] y de la Unión Europea [European10a], los trabajos de Granovskii [Granovskii06] y Thiel [Thiel10].

Este estudio examina principalmente la influencia económica de los factores externos al vehículo eléctrico en el momento de la adquisición, pero también los costes durante todo el ciclo de utilización, así como los factores que lo pueden resultar

atractivo hacia un cliente potencial como son los trabajos de “Electrification Coalition” [Electrification10b] y el trabajo de Plotkin del “Argonne National Laboratory” [Plotkin07] entre otros. Analizando el sector español, no hay demasiados estudios y aún menos estudios centrados en las políticas necesarias para la integración del vehículo eléctrico en la sociedad. Dentro de los más significativos se pueden citar los trabajos de G. A. Morales [Morales10], J.A. Lumbreras [Lumbreras08], L. M. López [Lopez09] y M. Mendiluce [Mendiluce11], si bien la temática ha sido de plena actualidad estos últimos años y es muy probable que surjan nuevos estudios con datos que incluyan el periodo de recesión económica.

Respecto a la metodología Dinámica de Sistemas que es la utilizada en este estudio, y que posteriormente se explicará con más detalle, existe gran cantidad de trabajos que han utilizado este método desde los comienzos del grupo de estudio del MIT en los años 70. Esta metodología es utilizada para el modelado de sistemas complejos y la ayuda en la toma de decisiones en muchos campos tales como sistemas medioambientales, la política económica, estrategia empresarial o política energética. Este último campo es en el que trabaja el Grupo de Energía y Dinámica de Sistemas de la Universidad de Valladolid [Castro09a, Castro09b, Mediavilla13, Movilla13]. No obstante, al combinar la técnica de la Dinámica de Sistemas con el vehículo eléctrico, la literatura encontrada se reduce drásticamente destacando trabajos como los de Tim Bongard [Bongard11] con un estudio de la viabilidad del vehículo eléctrico en Holanda pero a un nivel de detalle inferior, y el de Stefano Armenia [Armenia10] a pesar de que este último se centra principalmente en el balance energético. También merece la pena ser nombrado el trabajo de Sara Susanne Metcalf [Metcalf01] en el que realiza simulaciones de diferentes escenarios para las alternativas de sistemas de propulsión, pero dejando relativamente olvidado el vehículo eléctrico de batería.



## Capítulo 4

# Metodología de trabajo

La metodología de trabajo que se ha empleado está dividida en diversas fases. Lo primero a realizar es la formulación del problema a tratar y los objetivos que se pretenden lograr con la tesis, lo cual ha sido explicado en capítulos anteriores. A continuación es necesario un análisis exhaustivo de la literatura existente relacionada con el problema a tratar. Esto se ha descrito en capítulo anterior.

Una vez que las tareas iniciales se han resuelto, es el momento de la recopilación de los datos necesarios para poder comenzar a realizar el modelado del sistema en función de dichos datos. Esta parte de la metodología está íntimamente ligada al análisis de la literatura existente puesto que gran cantidad de la información y datos saldrá de ahí.

Una vez obtenidos los datos, se ha seleccionado la herramienta de modelado del sistema. En este caso dicha herramienta es la Dinámica de Sistemas. A partir de dicha elección se modela propiamente el modelo del sistema para lo cual se utilizará un programa denominado VENSIM como herramienta metodológica concreta para todos los modelos de dinámica de sistemas utilizados. Cuando el modelo se ha terminado de construir, se plantean los escenarios en los cuales se va a simular el modelo creado.

Por último, se simulan dichos escenarios y se analizan los resultados obtenidos creándose las conclusiones oportunas.

A continuación se ha detallado de una manera más concisa la metodología empleada.

Los potenciales desarrollos futuros en el sector de los vehículos eléctricos son todavía una incógnita, por lo que es imposible analizar todos los elementos influyentes, por lo que para prever el proceso de adopción del vehículo eléctrico, se debe utilizar una aproximación. En un trabajo previo de Geels [Geels04], se explica que la perspectiva conceptual de la transición de la tecnología del vehículo eléctrico es bastante compleja. “¿Puede ser puesto en funcionamiento para la investigación empírica? La prueba del pudín está en comerlo, es decir, utilizar la perspectiva de los análisis empíricos de la dinámica de los sistemas socio-técnicos”. Esto significa que hay una representación abstracta de las transiciones de tecnología. Sin embargo, se requiere una versión más empírica de este proceso.

La metodología empleada en este estudio, consiste en la creación de un modelo de simulación a través del cual se reproducirán diferentes alternativas políticas en diversos escenarios, dando lugar a diferentes resultados potenciales. Un modelo de simulación es una formulación simplificada de la realidad, basada en diversas hipótesis, es decir, una estructura que tiene ciertos comportamientos similares a la realidad que se modela, con respecto al objetivo último perseguido con la simulación, pero con la debilidad que implican las hipótesis y la simplificación.

Teniendo en cuenta la gran complejidad del modelo a crear, y la gran variedad de interacciones entre sus variables componentes, el método de investigación empleado para la creación del modelo y su análisis es la Dinámica de Sistemas. No es fácil modelar el proceso de difusión de una nueva tecnología. Sin embargo, la Dinámica de Sistemas es una herramienta apropiada para ello.

Según J. Sterman, uno de los referentes mundiales de la Dinámica de Sistemas, *'System Dynamics is a method that challenge us all how to move from generalizations (abstractness) about accelerating learning and system thinking to tools and processes that help us to understand complexity, design better operating policies, and guide*

*change in systems (concrete) from the smallest business to the planet as a world'*. [Sterman00].

La Dinámica de Sistemas es una metodología adecuada para estudiar la relación entre el comportamiento de un sistema complejo en el tiempo, que se define principalmente endógeno y su estructura subyacente. Los modelos de Dinámica de Sistemas, facilitan el desarrollo y las pruebas de las políticas que conducen a la mejora de la conducta del sistema [Pruyt08]. Por ello esta metodología ha sido aplicada para estudiar la difusión de los vehículos, ya que permite la introducción de factores intangibles como por ejemplo el atractivo del vehículo, y más importante, porque el comportamiento de la difusión del vehículo eléctrico se ve afectada de manera endógena a través del tiempo debido a la realimentación como por ejemplo el boca a boca.

Según J. Sterman, la Dinámica de Sistemas se utiliza para el análisis de políticas y estrategias, con un enfoque en las aplicaciones de negocios y públicas. Por otra parte, la Dinámica de Sistemas es una perspectiva y un conjunto de herramientas conceptuales que nos permiten entender la estructura y dinámica de sistemas complejos [Sterman00].

Entre los numerosos campos de aplicaciones de la dinámica de sistemas están la política de transporte y la congestión del tráfico, los ciclos de negocios, el diseño de las cadenas de suministro en las empresas y otras organizaciones, el uso y la fiabilidad de las previsiones, gestión de proyectos y desarrollo de productos, etc. [Sterman00]. El presente trabajo puede encuadrarse en este amplio campo de aplicaciones. El proceso total de la dinámica del sistema se refiere a la recopilación de información, de la cual las variables importantes son las relaciones de causalidad seleccionados y definidos en un diagrama de círculo causal. Una vez que la validación de estas relaciones causales se termina, un segundo modelo de stock y el flujo puede ser construido como la dinámica temporal de la situación.

La Dinámica de Sistemas es una herramienta de construcción de modelos de simulación para dar la propuesta más eficaz o solucionar un problema. Para una correcta comprensión del significado de esta herramienta, hay que empezar describiendo las palabras que componen su nombre *sistema* y *dinámica*: un sistema, en este contexto, es

un conjunto de elementos que interactúan entre sí, afectándose unos a otros, que operan con un fin común.

En cuanto al segundo término, dinámica, es lo opuesto a la estática, es decir, existen aspectos cambiantes que conforman el sistema a lo largo del tiempo, gracias a las interacciones que se producen entre los elementos.

Es por ello que la Dinámica de Sistemas, se puede definir como una metodología para comprender el cambio de complejos fenómenos que se producen en la naturaleza y estudiar su comportamiento a través del tiempo.

Esta metodología fue desarrollada a finales de la década de 1950 por el ingeniero de sistemas del MIT (Massachusetts Institute of Technology) Jay W. Forrester, siendo la primera publicación que dio origen a lo que hoy se conoce como Dinámica de Sistemas el libro “Industrial Dynamics” [Forrester61] en el año 1961.

Durante la década de los años 60, empiezan a aparecer los primeros resultados en esta materia, mientras que a finales sale a la luz un estudio de gran importancia para la dinámica de sistemas: el I Informe del Club de Roma sobre los límites al crecimiento, que utilizó en esta técnica. Se analizaban la previsible evolución de magnitudes como la población, los recursos y la contaminación [Forrester74], [Meadows72]. En el informe se analizaba la interacción de estas magnitudes y se determinaba que en un sistema la actuación sobre unos elementos prescindiendo de otros no conduce a resultados satisfactorios.

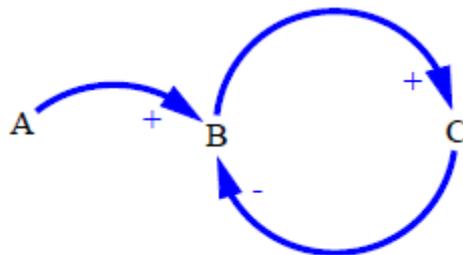
Gracias a esto, se puso de manifiesto que la Dinámica de Sistemas era algo más que la dinámica industrial o la dinámica urbana, y a partir de entonces, se convino la denominación de Dinámica de Sistemas como se conoce actualmente.

El proceso de utilización de Dinámica de Sistemas sigue ciertos pasos que están descritos a continuación. El primer paso consiste en la definición del problema. En este caso, se pretende obtener información acerca de la mejor política que se puede llevar a cabo para la paulatina implantación del vehículo eléctrico en España. Para ello será necesario el análisis de las subvenciones posibles que se pueden entregar, así como

su adecuación a los objetivos fijados por el Gobierno. Una vez conocido el problema, es necesario definir una hipótesis acerca del modelo.

La Dinámica de Sistemas utiliza *stocks* y flujos para representar la evolución del sistema, por lo que es necesario identificar los stocks y flujos principales, y esquematizar las influencias existentes entre ellos mediante lo que se denomina un diagrama de Forrester, que pueden ser flechas directas de una variable a otra o bucles de realimentación, tanto con una relación positiva o negativa según el modelo a estudiar.

La nomenclatura que se utiliza en Dinámica de Sistemas para visualizar las relaciones causales entre las variables de un sistema, es la que se muestra en la siguiente figura:



**Figura 6: Ejemplo de diagrama causal.**

Una influencia causal positiva, simbolizada por el “+”, significa que si la variable de influencia (que está en el origen de la flecha) aumenta entonces la variable influenciada (que está en la punta de la flecha) se incrementa. Una influencia causal negativa, simbolizada por el “-” significa que si la variable de influencia aumenta entonces la variable influenciada disminuye.

Con los elementos principales conectados, se puede generar un diagrama sinóptico con la hipótesis realizada.

Comenzando por la hipótesis y dependiendo de las diversas influencias y relaciones entre las variables, es posible desarrollar un modelo formal mediante un programa informático. Tal y como se ha mencionado al inicio del capítulo, en este caso se ha utilizado VENSIM como herramienta metodológica.

Para hacer el proceso de modelado más sencillo, y también ayudar a su visualización, se divide el modelo en subsistemas. En el programa cada subsistema será incluido en una ventana diferente donde estarán contenidas las variables correspondientes. De esta manera es más fácil identificar las diferentes estructuras y comportamientos, lo que facilita el proceso de modelado.

El siguiente paso es comprobar la validez o utilidad del modelo de simulación. Primeramente, el modelador debe estar seguro de haber construido una estructura correcta y que ningún factor importante ha sido olvidado. Posteriormente será posible que ciertas partes del modelo necesiten ser recalculadas de cara a poder validar el modelo. Habrá que repetir el proceso de modelado y validación hasta obtener el modelo correcto.

Cuando se considera que el proceso de modelado ha terminado, el resultado es un modelo capaz de entender el desarrollo del vehículo eléctrico en España. En este punto se pueden aplicar diferentes políticas para comprobar la idoneidad o no de la estrategia diseñada en función de los resultados simulados. Las simulaciones de políticas dan la posibilidad de realizar diferentes escenarios y ver cómo evoluciona el sistema. Por tanto, el modelo puede ser utilizado para proyectar el comportamiento de alternativas situaciones futuras a través de la prueba de los diferentes parámetros.

Sin embargo, es muy importante tener claro que, la Dinámica de Sistemas no es una herramienta diseñada para predecir el futuro, sino más bien es una herramienta para comprender el presente, es decir, comprender las variables que interactúan y de qué manera pueden influir.

Otro punto a explicar es que, el modelo de simulación, reproduce el comportamiento del sistema debido a los valores de los parámetros y debido a la estructura diseñada, pero el modelo será más sensitivo a ciertos parámetros que a otros. No obstante, el modelo trabaja con valores aproximados en ciertos casos, puesto que hay variables que son muy difíciles de obtener, como por ejemplo el desarrollo de los cargadores rápidos en España, lo que implica que es difícil obtener datos fiables sobre ellos.

Por último, indicar que las reglas de decisión de la población y otros supuestos hipotéticos, están basados en encuestas realizadas por asociaciones, así como en mi propia apreciación personal como comprador potencial.

Para finalizar indicar que en la Escuela de Ingenieros Superiores de Valladolid, ya se han realizado varios proyectos final de carrera e incluso tesis, basados en Dinámica de Sistemas.



## **Capítulo 5**

# **Descripción y justificación del modelo**

### **5.1 Descripción del modelo general**

A continuación, se van a mostrar en líneas generales los bloques de los que se compone el modelo y las interrelaciones existentes entre ellos. Una vez que se haya explicado el modelo en líneas generales se pormenorizarán los diferentes bloques existentes y sus relaciones.

En la siguiente figura se muestra un diagrama de bloques del modelo general creado para la tesis.

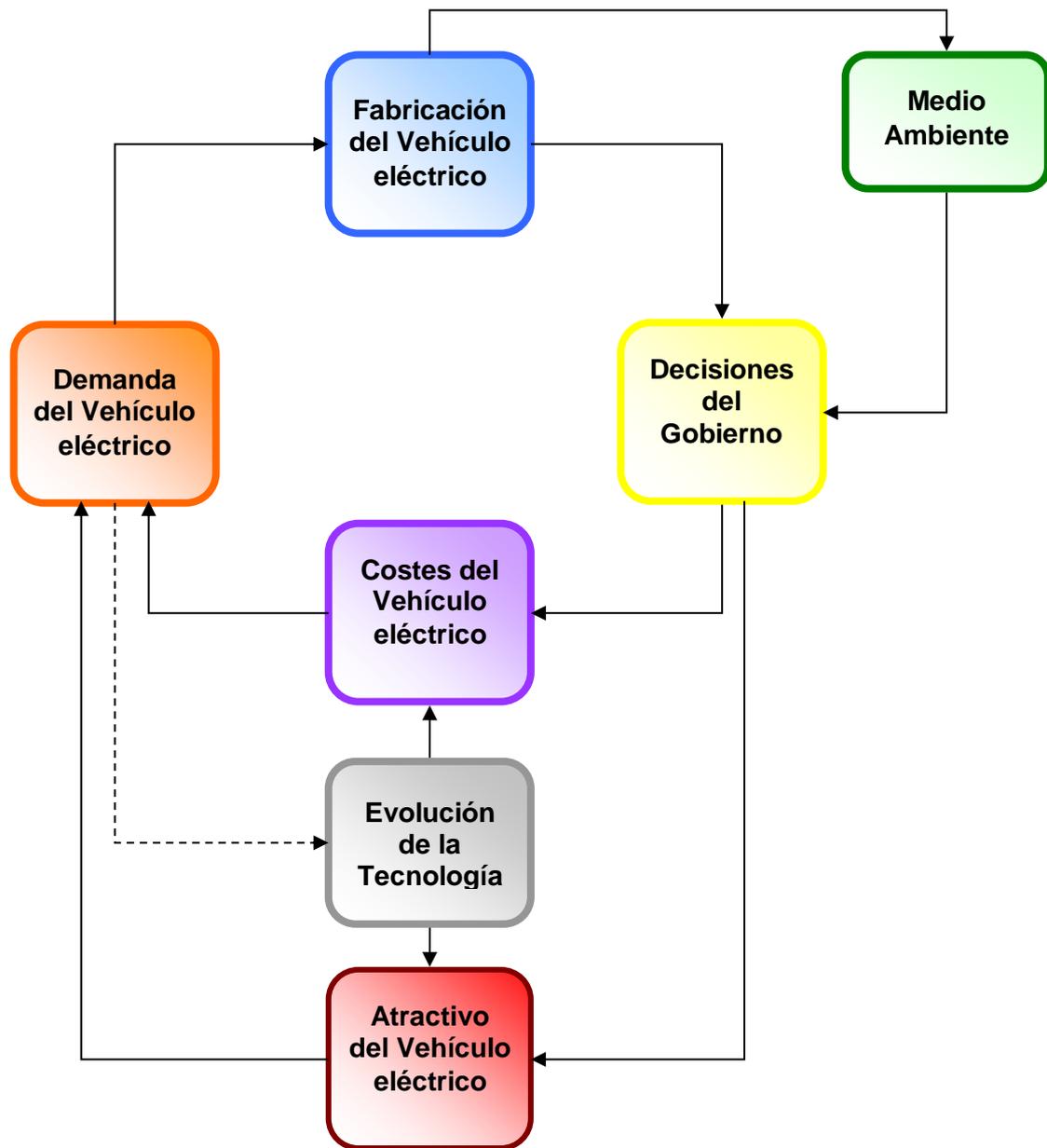


Figura 7: Diagrama de bloques general del modelo.

Inicialmente existe una demanda del vehículo eléctrico. Dicha demanda debe ser satisfecha mediante la fabricación de los vehículos. En este caso, se consideran los vehículos que van a resultar ser fabricados para el mercado Español, con independencia de en qué país se hayan fabricado. A medida que el número de vehículos fabricados vaya aumentando, obviamente, el parque de vehículos eléctricos también lo hará, lo que afectará claramente a las emisiones de CO<sub>2</sub> incluidas en el bloque Medioambiental, así como a las decisiones que el Gobierno pueda tomar bien sea en forma de subvenciones, tarifas especiales de carga, incremento del número de puntos de recarga, etc. Las decisiones del Gobierno, también se verán influenciadas por el bloque Medioambiental,

puesto que se irán modificando las subvenciones para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

Las decisiones que el Gobierno tome, van a influenciar de manera importante en el coste que el cliente potencial va a percibir a la hora de adquirir el vehículo eléctrico, debido a las subvenciones, como en el coste a lo largo de la vida útil del mismo bien sea por tarifas reducidas de carga nocturna, etc. Asimismo, las decisiones del Gobierno también van a afectar a lo atractivo que el vehículo eléctrico le resulta al consumidor, frente a un vehículo convencional. Esto es motivado por las ventajas o inconvenientes que pueda tener al adquirir un vehículo eléctrico, como puede ser la falta de puntos de recarga, el coste de las recargas, la publicidad que del vehículo eléctrico se haga etc. Tanto los costes del vehículo eléctrico, como su atractivo para el consumidor, van a estar directamente relacionados con la evolución que tenga la tecnología del vehículo eléctrico en los próximos años, debido a que una parte muy importante del precio de compra del vehículo eléctrico es la batería, y uno de los principales factores de preocupación de los compradores potenciales es la autonomía que disponen.

Para cerrar el bucle, la demanda del vehículo eléctrico irá evolucionando en el tiempo, influenciada por los costes que el vehículo tenga para el comprador (tanto en el momento inicial de la compra, como a lo largo de la vida del vehículo), y por el atractivo del mismo.

Por último, es interesante resaltar que en líneas globales, la evolución de las tecnologías asociadas al vehículo eléctrico también estarán influenciadas por la demanda del mismo, pero para este estudio no se considera esta vía, puesto que la demanda de vehículos eléctricos en España es una proporción muy pequeña en comparación a la demanda global que será la que motive los avances tecnológicos en esta materia.

De igual manera sucede con el resto de bloques, es decir, el sistema que se está tratando, no es un sistema aislado. En mayor o menor medida, el sistema se verá influenciado por el mercado mundial del vehículo eléctrico, pero para este estudio, se han considerado varios datos como variables exógenas, es decir, el valor de estas variables está determinado por factores no incluidos en el modelo que se está utilizando. Según esto, se puede determinar que el estudio cubre desarrollos a nivel mundial.

### *Alcance e hipótesis del trabajo*

Antes de comenzar a explicar en detalle el modelo general, es necesario acotar el alcance del mismo y formular algunas hipótesis y simplificaciones que han sido necesarias para abordar el modelado tratando de no perder valor en los resultados perseguidos.

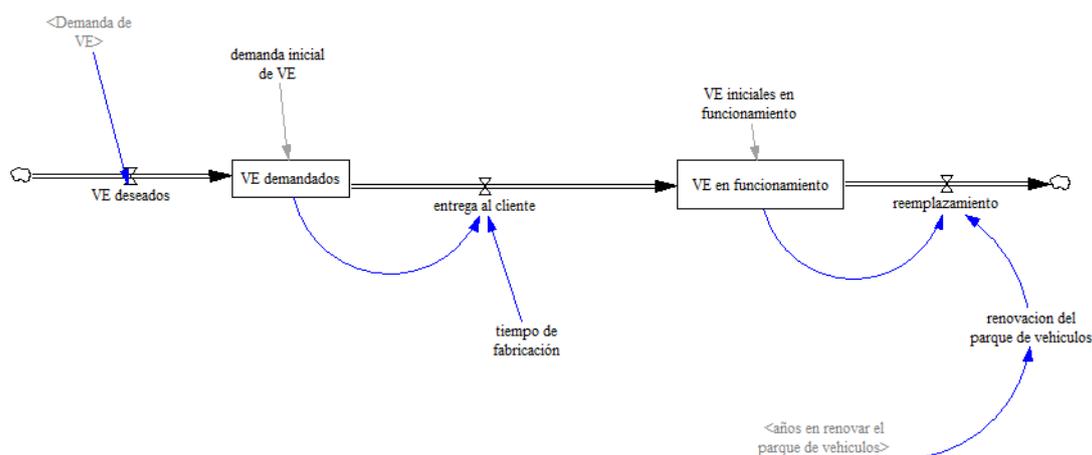
Además, existen incertidumbres sobre el futuro que podrían reducirse, pero que no pueden ser eliminadas independientemente de los recursos disponibles, como puede ser la evolución de las tecnologías empleadas en la fabricación de las baterías que a su vez va a desembocar en diferentes costos de fabricación, los precios de la electricidad y del petróleo, etc. Por lo tanto, existe una incertidumbre respecto a los resultados técnicos y económicos que se presentan. Simplemente, no se puede cuantificar esa incertidumbre.

Según esto, las simplificaciones realizadas se irán explicando en cada caso en el lugar de adopción y la justificación de su utilización.

## **5.2 Bloque de fabricación del vehículo eléctrico**

Pese a que tanto en el modelo simulado, como en el sistema real la fabricación del vehículo corresponde con el último paso del proceso, se ha decidido comenzar la explicación del modelo por este bloque puesto que es el más simple al poseer una única variable de entrada externa que es la demanda de vehículos eléctricos, la cual se genera en el bloque con el mismo nombre.

En la siguiente figura se puede ver el modelado del bloque completo:



**Figura 8: Modelo del bloque de fabricación del vehículo eléctrico.**

El modelo se compone de dos stocks, uno de los vehículos eléctricos que se han demandado pero aún no se han fabricado, que se denominará “Vehículos pendientes de fabricación” y otro de los vehículos eléctricos que van a estar en funcionamiento en la actualidad de cada año.

La variable de entrada al bloque es la demanda de vehículos eléctricos que actuará como flujo de entrada del primer stock. Inicialmente, se asume una demanda de vehículos eléctricos para el inicio de 2010 de ningún vehículo eléctrico.

Obviamente, los vehículos eléctricos no permanecerán en el stock de vehículos eléctricos demandados durante mucho tiempo. Únicamente el tiempo que transcurre entre que el cliente solicita el vehículo eléctrico al concesionario, y éste lo tramita y se fabrica. Este tiempo es muy variable, dependiendo del fabricante, pero en la actualidad para un vehículo convencional medio, se estima un tiempo de aproximadamente un mes y medio, por lo que para el vehículo eléctrico se ha asumido un valor de 3 meses, que es lo que en el modelo se ha denominado “tiempo de fabricación”. Este aumento de tiempo respecto al vehículo convencional es debido a que las líneas de producción todavía no se han optimizado al estar hablando de cadencias mínimas y se intentan agrupar pedidos para obtener un mejor rendimiento, lo que puede llevar a demorar el plazo de entrega. A pesar de que dicho tiempo pueda verse reducido en el futuro, no se ha considerado un dato significativo en el modelo por lo que se ha decidido mantenerlo constante. Una vez ha transcurrido este tiempo, se considera que el vehículo eléctrico ha sido entregado al cliente, por lo que ha dejado de estar demandado, lo que implica que abandona el stock

de vehículos eléctricos demandados para pasar a formar parte del stock de vehículos eléctricos en funcionamiento.

Como se puede ver en el diagrama, el flujo de salida del primer stock corresponde con el flujo de entrada al segundo stock. La fórmula del flujo es la siguiente:

*entrega al cliente=*

*VE demandados/(tiempo de fabricación)*

Para el stock de vehículos eléctricos en funcionamiento, se han considerado unas condiciones iniciales idénticas al stock anterior, es decir, en el inicio de 2010 no se ha considerado la existencia de vehículo eléctrico alguno, pese a que se conoce que sí que existen, pero el valor es tan insignificante frente al parque total de vehículos que se ha determinado que es nulo.

Con relación al stock de los vehículos eléctricos en funcionamiento, cabría pensar que durante el tiempo que dura la simulación (hasta el 2020) no debería tener salida alguna, es decir, todos los vehículos eléctricos que se adquirieran desde el 2010 hasta el 2020, en principio no deberían ser reemplazados ya que el ciclo de vida de las baterías es más que suficiente para poder utilizar el vehículo durante 10 años, según se podrá posteriormente observar en el bloque de la batería. No obstante, se ha considerado necesaria la inclusión de una salida del stock, debido a que los vehículos eléctricos que se adquirieran sí que van a tener cierto grado de renovación: pueden darse circunstancias tales como que el vehículo eléctrico se estropee y sea reemplazado por otro vehículo eléctrico o no, o que sufra algún percance como un accidente, o que simplemente, en el mercado haya ciertas evoluciones tecnológicas significativas que sean interesantes para el cliente potencial y decida cambiar el modelo que posee actualmente por otro distinto.

Para modelar este reemplazamiento se ha tenido en cuenta el número de vehículos eléctricos existentes en cada momento así como el grado de renovación existente en el parque de vehículos actual que es de 15 años. Es decir, cada 15 años se renueva el parque automovilístico completo [Bandivadekar08], [Vyas97]. Esto no implica que hasta que el vehículo no tenga 15 años de uso no es renovado, sino que la

renovación completa del parque se realiza cada 15 años, en términos de media estadística.

$$\text{reemplazamiento} =$$

$$VE \text{ en funcionamiento} * \text{renovación del parque de vehículos}$$

Como cabe esperar, el valor de los años de renovación del parque automovilístico realmente no será constante puesto que existen numerosos factores que pueden influir en él, aunque de una manera muy determinante lo hará el factor económico. En una situación de bonanza económica, el consumidor realizará una renovación de su vehículo de una manera más veloz que en una situación de crisis económica. Esto se puede observar en la siguiente gráfica.

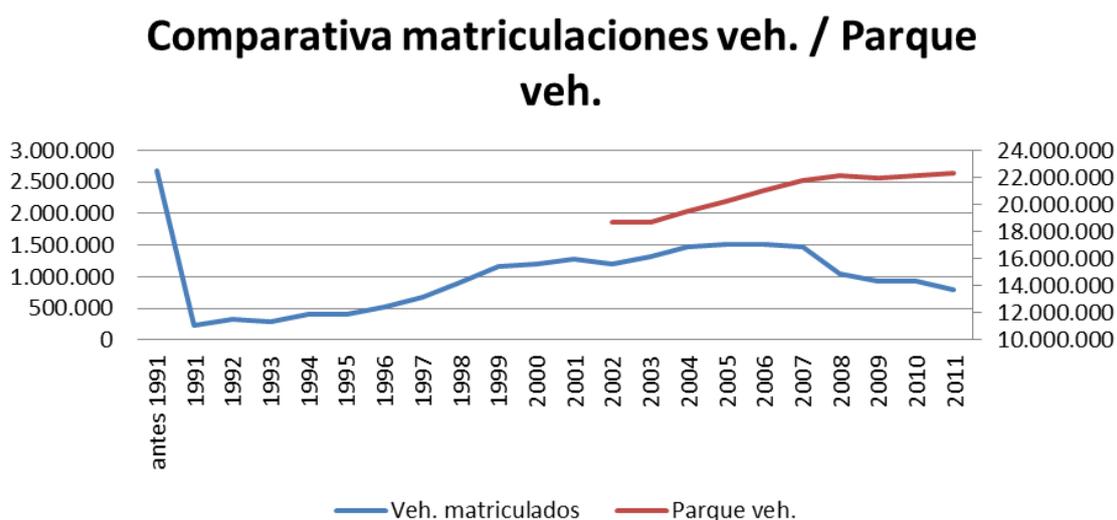


Figura 9: Comparativa entre matriculaciones de turismos y el parque existente en España [Dgt11].

Se aprecia como en los años de suficiencia económica las ventas de vehículos han aumentado mientras que el parque de vehículos también lo hacía. Esto es originado porque el cliente no sólo adquiriría un vehículo como reemplazo de otro, sino que también se adquirirían segundos vehículos para una misma familia. Sin embargo, en el momento que la crisis económica melló en la sociedad española se puede apreciar cómo las ventas de vehículos descienden bruscamente mientras que el parque automovilístico no lo hace sino que sigue aumentando aunque de una manera mucho más lenta que en el periodo anterior. Esto justifica que los años de renovación del parque aumenten puesto

que el parque automovilístico no desciende a pesar de que las ventas sí lo hacen, es decir, los clientes utilizan durante un mayor tiempo el mismo vehículo.

A pesar de ello, se ha decidido simplificar el modelo manteniendo el valor constante en 15 años, puesto que los resultados no van a variar de manera significativa y se añadiría una complejidad innecesaria al modelo.

### 5.3 Bloque de evolución de las tecnologías

Si bien es cierto que se esperan numerosos avances en el campo tecnológico del vehículo eléctrico, por todos es sabido que la pieza clave tanto en el desarrollo del vehículo eléctrico como en el futuro del mismo es la batería. Según esto, dentro de este bloque pese a que también se van a analizar factores de reducción del consumo eléctrico del vehículo, el principal aspecto que ha sido necesario modelar es el referente a la evolución de la batería tanto en capacidad de almacenamiento como en descenso del precio motivado por la fabricación a gran escala.

En este bloque se han identificado los principales avances tecnológicos, y se utilizarán las proyecciones del posible desarrollo de las tecnologías, basados en los diversos estudios existentes.

Antes de comenzar la explicación del modelo del bloque como tal, se ha considerado importante realizar algunos comentarios sobre las baterías para poder determinar el tipo de batería a estudiar y sus características.

En la actualidad, existen numerosos tipos de batería disponibles [Santamarta09], [Eurobat05]:

- **Plomo-ácido:** Son las más antiguas baterías y tienen una baja relación entre la electricidad acumulada con el peso y el volumen. Ocupan mucho espacio y pesan mucho, pero son duraderas y de bajo coste.
- **Níquel Cadmio (NiCd):** Utilizan un ánodo de níquel y un cátodo de cadmio. El cadmio es un metal pesado muy tóxico, por lo que han sido prohibidas por la Unión Europea.

- **Baterías de Níquel-Hidruro Metálico (NiMH):** Las baterías recargables de níquel hidruro metálico son muy similar a la de níquel cadmio, pero sin el metal tóxico, por lo que su impacto ambiental es muy inferior. Utiliza un ánodo de oxidróxido de níquel (NiOOH), como la batería de níquel cadmio, pero su cátodo es de una aleación de hidruro metálico con lo que se consigue eliminar el cadmio. Las baterías recargables de níquel hidruro metálico almacenan de 2 a 3 veces más electricidad que sus equivalentes en peso de níquel cadmio, aunque también se ven afectadas por el efecto memoria. Estas son las baterías que se han venido utilizando en los antiguos vehículos eléctricos como por ejemplo el EV1 de General Motors, y las que se siguen utilizando hoy en día en algunos vehículos híbridos.
- **Iones de litio (Li-ion):** Las baterías de iones de litio deben su desarrollo a la telefonía móvil y su desarrollo es muy reciente. La batería de iones de litio es actualmente la tecnología de las baterías dominante en las aplicaciones portátiles. Introducido al mercado por Sony en 1991, las baterías representan el 70% del mercado de 7 mil millones de dólares de pilas, acumuladores portátiles y recargables [Efte09]. Su densidad energética asciende a unos 115 Wh/kg, y no sufren el efecto memoria. A pesar de sus indudables ventajas, también presentan inconvenientes: sobrecalentamiento, alto coste y, sobre todo, las reservas de litio, sujetas a una gran controversia.
- **Baterías de polímero de litio:** Es una tecnología similar a la de iones de litio, pero con una mayor densidad de energía, diseño ultraligero y una tasa de descarga superior. Entre sus desventajas está la alta inestabilidad de las baterías si se sobrecargan y si la descarga se produce por debajo de cierto voltaje.
- **Baterías Zebra (NaNiCl):** Una de las baterías recargables que más prometen son las conocidas como Zebra. Tienen una alta densidad energética, pero operan en un rango de temperaturas que va de 270°C a 350°C, lo que requiere un aislamiento. Como dato, el automóvil eléctrico Think City va equipado con baterías Zebra.

A continuación se puede ver una tabla que recoge las principales características de las baterías anteriormente descritas.

	Densidad de Energía (Wh/kg)	Densidad de Potencia (W/kg)	Coste (\$/kwh)	Ciclos
Plomo-ácido	20-30	200-500	100-200	300-800
NiCd	60	200	NA	2.000
NiMH	50-70	1000-1500	1.000	2.000
Polímeros de Li	100-120	200-250	NA	NA
Zebra	100-120	180	600	1.000
Li-ion	75-120	1000-3000	1000-2000	1000-3000

**Tabla 1: Principales características de los diferentes tipos de baterías [Eurobat05], [Berr08].**

Antes de continuar es necesario definir un concepto clave de cara a las baterías del vehículo eléctrico: la densidad de energía. La densidad energética representa la cantidad de energía acumulada en un sistema dado o en una región del espacio, por unidad de volumen en un punto. Mientras mayor sea la densidad de energía, más energía habrá disponible para acumular o transportar por volumen o por masa dados. En el campo que nos ocupa, tendrá una relevancia muy importante ya que tendrá una gran influencia sobre el peso final del vehículo. A mayor densidad de energía, menor peso tendrá la batería.

Los requisitos de rendimiento de la batería están determinados por las capacidades funcionales que la batería debe proporcionar para el vehículo, y por el nivel mínimo en el que estas funciones tienen que realizarse. En un estudio publicado por el “California Air Resources Board” se representa un resumen de los requerimientos de almacenamiento de energía en el vehículo eléctrico [Kalhammer07].

	<b>Peso máximo (kg)</b>	<b>Potencia máxima (kW)</b>	<b>Densidad de potencia (W/kg)</b>	<b>Mínima capacidad de arranque (kWh)</b>	<b>Densidad de energía (Wh/kg)</b>
<b>Vehículo eléctrico</b>	250	50-100 <sup>24</sup>	200;400 <sup>24</sup>	25;40 <sup>24</sup>	100;160 <sup>24</sup>

**Tabla 2: Requerimientos de almacenamiento de energía en el vehículo eléctrico [Kalhammer07].**

Al comparar la tabla de necesidades con la tabla de características de las baterías, se puede comprobar que de todos los tipos de baterías, la realidad es que sólo

la competencia actual existe entre las baterías de NiMH y las de iones de litio, como se puede ver en la siguiente gráfica de rangos de energía [Kromer07], [Berr08].

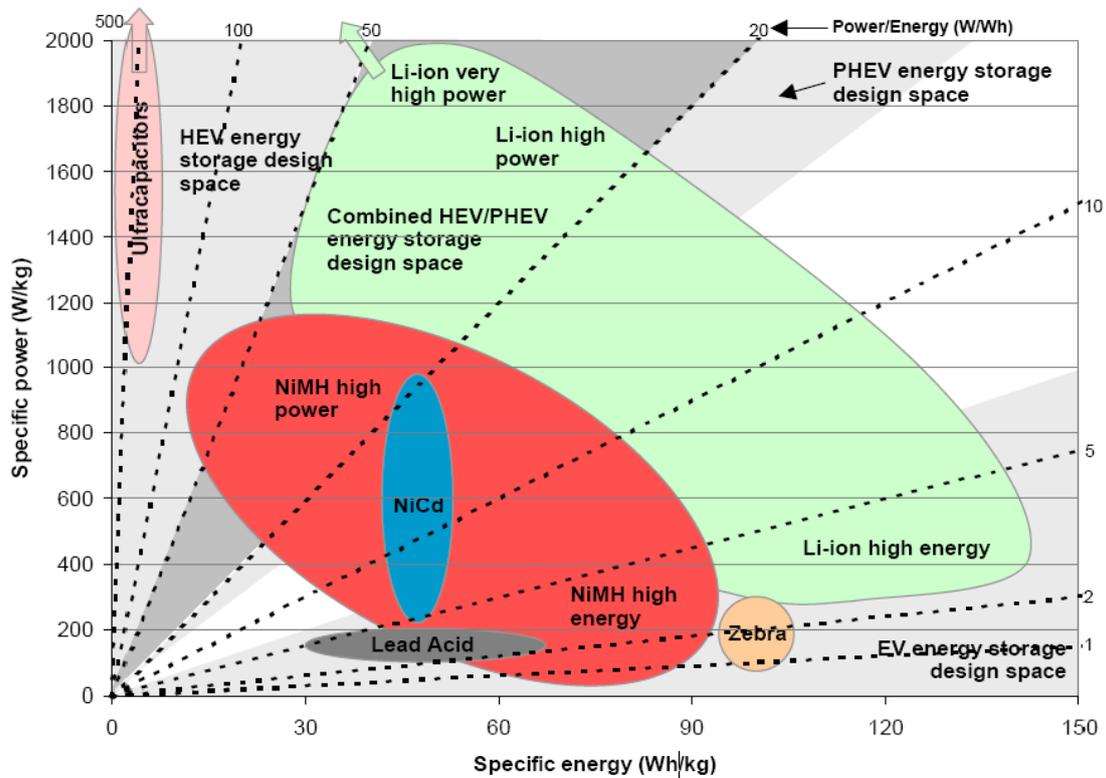
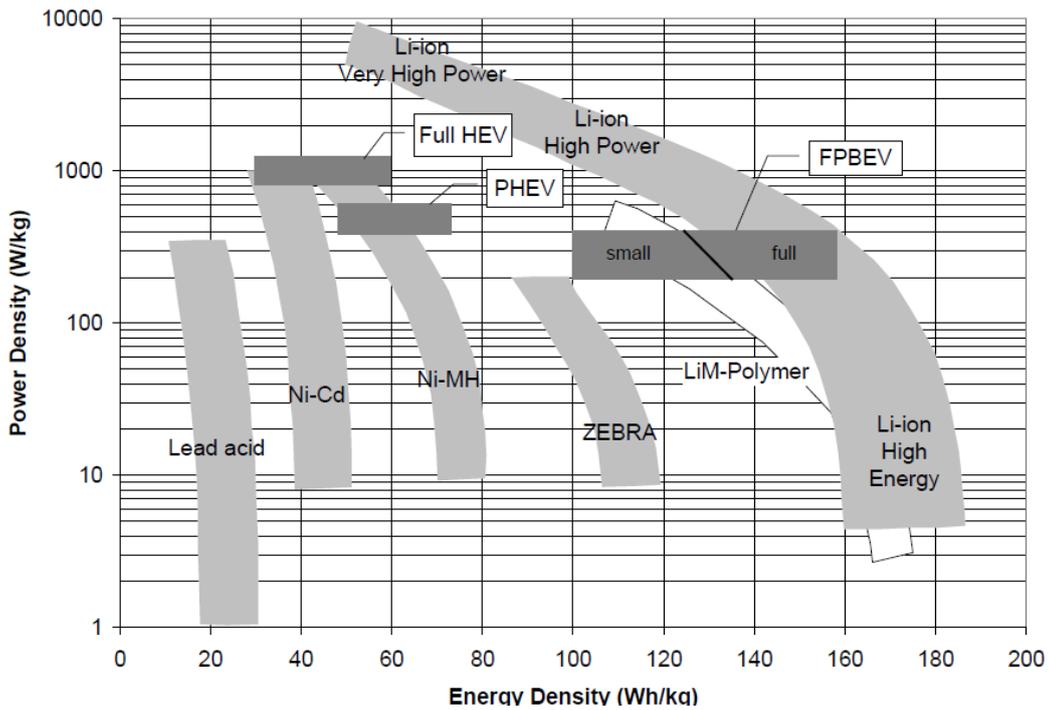


Figura 10: Rangos de energía de los diferentes tipos de baterías [Kromer07].

Y al relacionar los tipos de baterías con las necesidades de cada tipo de vehículo se obtiene la siguiente figura:



**Figura 11: Rangos de energía de los diferentes tipos de baterías en función de la densidad de potencia [Kromer07].**

A continuación se incluye un breve descriptivo de las dos principales tecnologías de baterías estudiadas para el caso del vehículo eléctrico:

***Baterías de Níquel-Hidruro Metálico (NiMH)***

La batería NiMH se presentó por primera vez en producción a finales de 1980, como un reemplazo ambientalmente más aceptable para las baterías de Ni-Cd en aplicaciones para el consumidor. Las baterías de NiMH han sido capaces de reemplazar las baterías de Ni-Cd en muchas aplicaciones portátiles, debido a su mayor energía específica y densidad de energía, así como por razones ambientales.

Este tipo de baterías utilizan una aleación de absorción de hidrógeno como electrodo negativo, y óxido de níquel como electrodo positivo, un electrolito alcalino, y un separador hecho a partir de material poroso de poliolefina. El voltaje de la batería de NiMH es relativamente bajo, 1,2 voltios.

La clave para la viabilidad de las baterías de NiMH fue el descubrimiento de aleaciones basadas en níquel que retienen su integridad estructural durante un gran número de ciclos de carga y descarga.

La principal ventaja de la batería NiMH es su potencial para un largo ciclo de vida. La principal limitación técnica de las baterías de NiMH es la energía específica modesta que posee, que también se deriva del bajo voltaje de la batería.

Las baterías de NiMH han demostrado una alta fiabilidad y una larga vida útil en aplicaciones de automoción, a partir de su uso como baterías de vehículos eléctricos en varios miles de vehículos construidos y alquilados o vendidos por los principales fabricantes de automóviles bajo las disposiciones de la regulación de la “California Air Resources Board”. Sin embargo, para permitir rangos de conducción de unos 75 a 100 kilómetros para vehículos compactos o de tamaño medio, estas baterías demostraron que necesitan capacidades como mínimo de 30 kWh. Con una representativa densidad de energía de 50-55 Wh/kg, una batería completa de NiMH de 30 kWh pesa entre 540 y 600 kg, añadiendo casi el 40% del peso de un vehículo convencional. Este peso es muy superior al establecido para las baterías de los vehículos eléctricos como se vio en la tabla anterior, y tiende a descalificar a las baterías de NiMH para su aplicación en estos vehículos. La modesta densidad de energía de las baterías NiMH es una limitación inherente y tiene pocas probabilidades de aumentar ni siquiera con el esfuerzo de los desarrolladores.

### ***Baterías de Iones de Litio (Li-ion)***

Como el metal más ligero y el elemento más electronegativo, el litio es el material más atractivo para la creación del electrodo negativo (ánodo) para las baterías de alta energía. Sin embargo, una alta reactividad con el agua y con los disolventes utilizados en los electrolitos de las baterías orgánicas impedían el uso de litio en baterías recargables hasta que se hicieron dos descubrimientos importantes hace 20 años aproximadamente: el litio puede ser insertado (“intercalado”) electroquímicamente en materiales de carbono “de acogida”, formando una capa protectora en la interfaz del carbono-litio que contiene el electrolito con disolvente orgánico cuando una célula se carga por primera vez. Sorprendentemente, esta interfaz es capaz de prevenir el ataque de los electrolitos por el litio, pero permite el paso de iones de litio durante el ciclo de carga y descarga. El material huésped que forma el electrodo negativo en las células de iones de litio está hecho de calidades especiales de grafito. Mezclado con aglutinantes,

estos átomos de carbono se depositan en finas hojas de cobre que sirven como soportes conductores.

Una variedad de materiales se puede combinar con base de carbono-negativos en las células de la batería, utilizando electrolitos orgánicos. Mezclado con carbono para aumentar la conductividad y con aglutinantes, estos materiales se depositan en finas hojas de aluminio como soportes conductores.

En la siguiente tabla se enumeran los materiales para el positivo de los electrodos en el contexto de la actual tecnología de baterías de iones de litio [Kalhammer07].

Material Activo	Capacidad Almacenamiento (mAh/g)	Tensión Nominal (V)	Estabilidad a altas T <sup>a</sup>	Estabilidad frente a disolución	Rango de coste material activo	
					(\$/kg)	(\$/kWh)
LiCoO <sub>2</sub>	145	3,6	Regular	Muy buena	30-40	57-75
Li(Ni <sub>0,85</sub> Co <sub>0,1</sub> Al <sub>0,005</sub> )O <sub>2</sub>	160	3,6	Regular	Muy buena	28-30	≈50
Li(Ni <sub>1/3</sub> Co <sub>1/3</sub> Mn <sub>1/3</sub> )O <sub>2</sub>	120 (200)	3,6 (3,9)	Buena	Buena	22-25	≈55(≈30)
LiMnO <sub>2</sub>	100	3,9	Muy buena	Pobre	8-10	≈25
LiFePO <sub>4</sub>	150	3,3	Muy buena	Muy buena	16-20	≈30

**Tabla 3: Materiales de electrodos de baterías de iones de litio [Kalhammer07].**

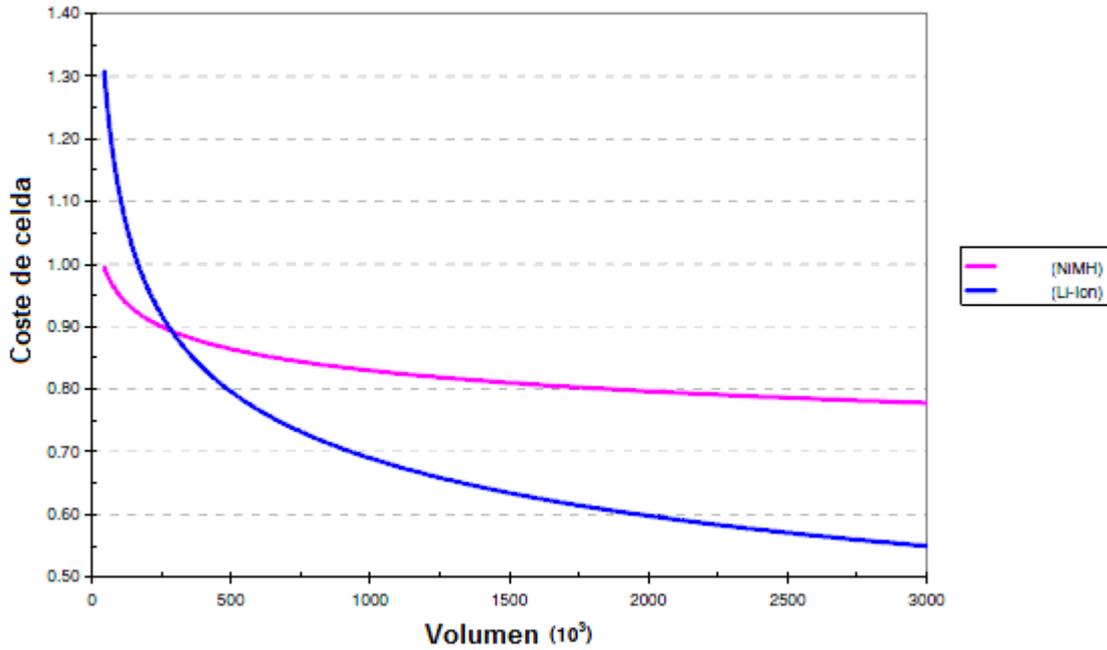
Uno de los atractivos clave de las baterías de litio es el alto voltaje de la celda, que es el resultado directo del gran potencial negativo del litio. Con los positivos de óxidos mixtos actualmente utilizados, el rango de voltaje de operación de las células de iones de litio es de aproximadamente 2,75 a 4,2 voltios. El voltaje nominal (promedio) de descarga es de alrededor de 3,6 voltios, siendo el de la mayoría de las células entre 4 y 3,5 voltios. Con positivos de fosfato de hierro, la tensión nominal es de 3,3 voltios aproximadamente como se ha podido observar en la tabla anterior.

El alto voltaje de la celda es la razón fundamental de la alta energía específica de las células de iones de litio y por tanto de las baterías. El alto voltaje de la célula también se traduce en un menor número de células para una batería de una tensión dada, lo que reduce los costes de fabricación y aporta una mayor fiabilidad.

La mayoría de los estudios esperan que la tecnología de iones de litio pueda suplantar a las baterías de NiMH [Deutsche08], ya que pueden proporcionar entre 1,4 y

2 veces más potencia y energía para un peso determinado, y tienen mayor potencial de ahorro en comparación con la tecnología NiMH. Como se ha mencionado, esto es debido principalmente a su alto voltaje: el estándar de tensión de NiMH es de  $\sim 1,2$  V, mientras que una batería de iones de litio tiene un voltaje de 3,6V [Kromer07]. Por lo tanto, aunque con una menor capacidad de almacenamiento de carga, la batería de iones de litio puede lograr una superior energía y potencia específica. Mientras la batería NiMH está a niveles fundamentalmente en límites prácticos (estimado en  $\sim 75$  Wh), las baterías de iones de litio pueden seguir mejorando ya que es una tecnología relativamente nueva. La energía disponible por unidad de volumen a niveles de potencia comparable es de entre un 20% y 80% más alto, los módulos generales son entre un 20% y un 30% más pequeños y entre un 30% y 40% más ligeros. Esto implica baterías más pequeñas, ligeras, y con un menor costo [Deutsche08]. Debido a la alta capacidad de las materias activas y a una única célula de 3,6V, las baterías de iones de litio ofrecen la más alta densidad de energía de todos los sistemas recargables, operando a temperatura ambiente: aproximadamente el doble de la energía específica de NiMH y tres veces mayor que las baterías de plomo ácido [Eurobat05].

El segundo factor que hace más competitivas a las baterías de iones de litio frente a las de NiMH es el reducido coste que tienen cuando se fabrican a gran escala, como se puede ver en la siguiente figura [Kromer07]. Aunque hoy en día, las baterías de iones de litio son más caras que las baterías de NiMH actuales, las baterías de iones de litio pueden acceder más fácilmente a una producción de alto volumen, por lo que tienen un mayor potencial de reducción de costes. Quizás lo más importante es que, mientras que los materiales constituyentes de las baterías de NiMH más caros están intrínsecamente ligados a los precios de los productos básicos de níquel (relativamente caros), los de las baterías de iones de litio se pueden hacer de una serie de diferentes materiales fungibles. Por ejemplo, los cátodos que actualmente son predominantes, no sólo pueden utilizar el cobalto (el estándar actual, pero más caro), sino que también pueden hacerse de níquel, manganeso o aluminio (más barato). En el largo plazo, hay un gran potencial para la transición a unos materiales con un costo aún más bajo.



**Figura 12: Comparativa de reducción del coste de las baterías de NiMH y de iones de litio con la fabricación a gran escala [Kromer07].**

No obstante, no hay un claro acuerdo en cuanto al potencial de reducción de coste de las baterías de iones de litio según los numerosos estudios (si bien hay bastantes estimaciones), pero se piensa que la solución yace en las economías de escala y la optimización de los procesos de fabricación [Berr08]. En comparación con los chips de ordenador, que se ha duplicado el rendimiento más o menos cada dos años, por décadas, las baterías han mejorado muy poco en sus 200 años de historia. En la siguiente figura [Kromer07] se puede observar que, en la década de 1991-2001, el costo de las baterías de iones de litio se redujo considerablemente, mientras que se aumentó la capacidad.

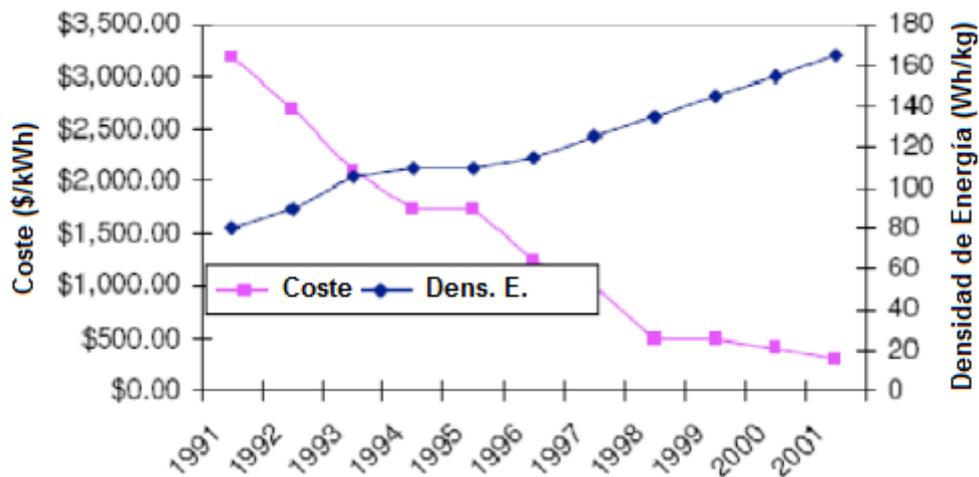


Figura 13: Comparativa de reducción del coste de las baterías de iones de litio con la densidad de energía [Kromer07].

Según esto, se puede considerar que el tipo de batería de iones de litio para el desarrollo en aplicaciones automovilísticas a corto plazo es viable y ofrecen un grado de performance significativo con un peso y coste bueno en relación al resto de alternativas [Bandivadekar08], por lo que no se estudiarán más alternativas en la tesis, si bien se analizará la factibilidad de la implantación de estas baterías en el vehículo eléctrico.

Como se ha mencionado anteriormente, las baterías de iones de litio ofrecen la más alta densidad de energía de todos los sistemas recargables. Además de ser más ligeras, no sufren de “efecto memoria”: la pérdida de la capacidad que se produce cuando una batería se recarga sin estar completamente agotada. Sin embargo, pese a que la batería de iones de litio parece ser el candidato más plausible para el despliegue futuro, su éxito no está asegurado puesto que poseen algunas desventajas: tienden a volverse inestable si se sobrecalienta o sobrecarga, dificultad de funcionamiento a muy altas o muy bajas temperaturas, etc.

Los principales problemas en los que las baterías de litio deben evolucionar positivamente para conquistar el mercado son [Kromer07]:

- Seguridad: tiene problemas de electrolitos inflamables y metales inestables. La pregunta principal que rodea hoy en día a las baterías de iones de litio es la tendencia a inflamarse si se sobrecarga o cuando existe sobrecalentamiento. Bajo estas condiciones, el cátodo de metal-

óxido se vuelve inestable y libera oxígeno, que puede encender el electrolito inflamables o el litio que se deposita sobre el ánodo, generando más calor y, posiblemente, encendiendo las células vecinas (la denominada “fuga térmica”) [Ritchie 2006]. En el ámbito de la electrónica de consumo, se tratan las cuestiones de seguridad con una preocupación menor debido a las bajas potencias involucradas y el hecho de que, con sólo unas pocas células conectadas, las posibilidades de fracaso de la batería se reducen mucho. Para aplicaciones de automoción, debido a que las consecuencias de escapes térmicos son mucho más peligrosas, estas cuestiones de seguridad se vuelvan críticas. El problema de la seguridad puede ser abordado mediante el uso de materiales más estables o a través de redundancias, es decir, con sistemas a prueba de fallos externos. Un enfoque viable de cara al futuro también es la transición de los óxidos de níquel o cobalto actuales, cuya oxidación inestable inicia la fuga térmica, a los cátodos con seguridad intrínseca (por ejemplo cátodos de hierro fosfatado).

- Mejora de los ciclos de vida debido a las reacciones entre el electrodo y los electrolitos y la deformación del ánodo. Las baterías de iones de litio tienden a perder tanto capacidad como potencia en función del tiempo y del uso. El ciclo de vida y la vida útil son altamente dependientes de la velocidad de descarga, la profundidad de la descarga, y de la temperatura de utilización. En la siguiente figura se puede ver cómo a medida que la temperatura aumenta, la pérdida de capacidad se va acrecentando con los años de utilización.

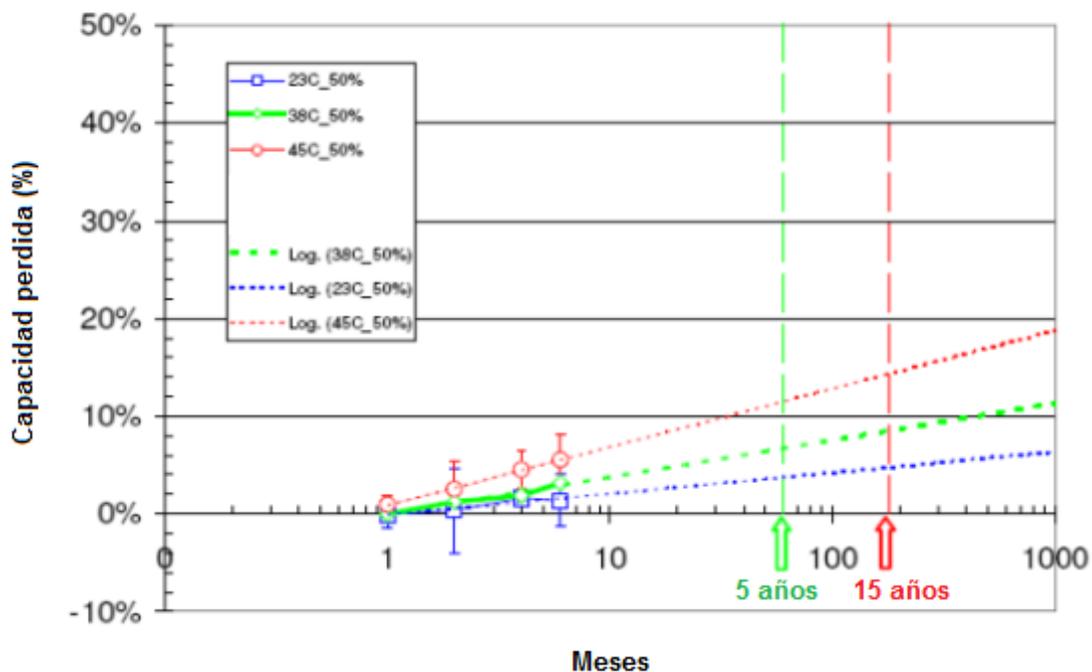


Figura 14: Pérdida de capacidad en función de la temperatura y los años de utilización [Kromer07].

Estos problemas de durabilidad pueden ser abordados, por la transición a nuevos materiales con propiedades más favorables. Los problemas con el ciclo de vida puede ser eficazmente mitigados por el sobredimensionamiento de la batería, ya sea en la dimensión de la energía (y operando en un restringido estado de carga) o sobre la dimensión de alimentación. El inconveniente de este enfoque es que es caro, ya que la estrategia implica el ajuste de la batería a una ventana de operación de uso obligatorio y de por vida. En teoría, la vida útil puede extenderse mediante el almacenamiento de la batería a baja temperatura y en estados inferiores de carga completa. En la práctica, estas estrategias de mitigación de la vida son problemáticas, ya que no hay manera de controlar estos parámetros en el sector de la automoción. El problema puede ser parcialmente mitigado mediante la recarga de la batería hasta justo debajo de la capacidad máxima de la misma lo que no parece demasiado viable. Del lado de los materiales, la durabilidad podría ser mejorada encontrando combinaciones de

electrodos y electrolitos que no reaccionen entre ellos y ánodos que muestren deformación mínima (por ejemplo el ánodo de litio-titanio)

- Ser capaz de mantener elevada potencia y energía a lo largo de su vida útil por problemas de capacidad del material. La capacidad de la batería y la potencia son dependientes tanto en las propiedades del material como del diseño de la batería. Las propiedades de los materiales imponen fundamentalmente los límites sobre la capacidad de la batería. Dentro de esta restricción, el diseño de la batería puede ser optimizado para entregar una mayor energía o potencia. Los diseños tradicionales de baterías suelen incurrir en una solución de compromiso a este respecto: altos ratios de densidad de energía se consiguen mediante el uso de electrodos de película delgada que rápidamente pueden liberar o tomar iones y electrones, y la alta potencia se consigue utilizando electrodos más gruesos que pueden contener más material activo [Srinivasan04]. No obstante, el desarrollo de electrodos de nanoestructuras puede cambiar esto de manera drástica. Estos electrodos ofrecen el potencial para optimizar simultáneamente tanto la potencia como la energía. La delgada capa permite altos ratios de densidad de energía, mientras que la amplia superficie de área permite alta potencia. [Bullis06]. Tal y como se ha explicado anteriormente, la densidad de energía de estas baterías ha evolucionado muy satisfactoriamente en las últimas décadas, a un ritmo de aproximadamente 7% cada año, y se prevé una mejora de un 3,5% por año para las próximas décadas [Chiang06].
- Coste: debido a los bajos volúmenes de producción y a los caros materiales. Esta problemática será tratada en detalle posteriormente.

No obstante, y pese a estas desventajas, parece clara la tendencia tecnológica y de mercado hacia este tipo de baterías. Los primeros ejemplos de esto son los actuales vehículos híbridos del mercado tales como el Mercedes S 400 BlueHybrid, el BMW Concept 7 Series Active Hybrid y el Mitsubishi i-EV.

La gran incógnita por desvelar es si la industria de las baterías va a disponer de suficiente litio para hacer frente a la creciente demanda. El litio no es el único material necesario para la fabricación de las baterías, sin embargo, la demanda de algunos otros materiales es probable que también se eleve significativamente con la electrificación del vehículo como el cobalto, el níquel y el cobre, para usos como las entradas de la batería, productos de acero de aleación de aluminio y para la construcción de vehículos (ver tabla siguiente) [Deutsche08]. Sin embargo, ninguno de estos otros materiales parece plantear tanto riesgo de escasez de recursos como el litio. En la siguiente tabla se puede observar las previsiones de aumento de productos en función del aumento de la producción de las baterías de iones de litio.

	2012	2015	2018	2020
<b>LITIO</b>	<b>10.703</b>	<b>33.301</b>	<b>62.544</b>	<b>85.870</b>
<b>NIQUEL</b>	<b>5.946</b>	<b>18.501</b>	<b>34.747</b>	<b>47.261</b>
<b>COBALTO</b>	<b>2.378</b>	<b>7.400</b>	<b>13.899</b>	<b>18.904</b>
<b>ALUMINIO</b>	<b>2.378</b>	<b>7.400</b>	<b>13.899</b>	<b>18.904</b>
<b>MANGANESO</b>	<b>3.568</b>	<b>11.100</b>	<b>20.848</b>	<b>28.357</b>
<b>HIERRO</b>	<b>3.568</b>	<b>11.100</b>	<b>20.848</b>	<b>28.357</b>
<b>FOSFATO</b>	<b>3.568</b>	<b>11.100</b>	<b>20.848</b>	<b>28.357</b>
<b>COBRE</b>	<b>21.406</b>	<b>66.603</b>	<b>125.088</b>	<b>170.140</b>
<b>GRAFITO</b>	<b>6.279</b>	<b>19.537</b>	<b>36.693</b>	<b>49.908</b>
<b>CARBÓN DURO</b>	<b>3.140</b>	<b>9.768</b>	<b>18.346</b>	<b>24.954</b>

**Tabla 4: Previsión de necesidades de productos para el mercado de baterías de iones de litio para automóviles (Toneladas) [Deutsche08].**

El último informe sobre las reservas globales de litio por el USGS (Servicio Geológico de EE.UU.) del año 2011 ha identificado una reserva mundial de 13 millones de toneladas, con una base de reservas de 11 millones de toneladas [Usgs09], [Usgs11]. Esto significa que 13 millones de toneladas son económicamente recuperables, y el resto reservas probadas geológicamente, pero no necesariamente económicas para recuperar en la actualidad. Casi la mitad de la base de reservas (5,4 millones de toneladas) se encuentra en Bolivia y está prácticamente sin explotar. Si se comparan los datos de reservas económicamente viables que se obtienen año a año, los datos invitan al optimismo, puesto que en el año 2008 existían unas reservas económicamente viables de poco más de 4 millones de toneladas [Usgs09], mientras que en el año 2011 ese valor se ha triplicado [Usgs11] gracias a los nuevos yacimientos encontrados en Argentina y principalmente en Chile y China. De acuerdo con el Departamento de Transporte de

Reino Unido, el litio para su uso en baterías tendrá un impacto mínimo en las reservas, incluso si la producción se ampliara [Berr08].

	PRODUCCIÓN				RESERVAS	RESERVAS NO
	2007	2008	2009	2010	ECONÓMICAS	ECONÓMICAS
Estados Unidos	NA	NA	NA	NA	38.000	410.000
Argentina	3.000	3.200	2.220	2.900	850.000	NA
Australia	6.910	6.900	6.280	8.500	580.000	220.000
Bolivia	0	0	0	0	0	5.400.000
Brasil	180	180	160	180	64.000	910.000
Canada	707	710	310	0	0	360.000
Chile	11.100	12.000	5.620	8.800	7.500.000	3.000.000
China	3.010	3.500	3.760	4.500	3.500.000	1.100.000
Portugal	570	570	0	0	10.000	NA
Zimbawe	300	300	400	470	23.000	27.000
Total Mundo sin EEUU (redondeado)	<b>25.800</b>	<b>27.400</b>	<b>18.800</b>	<b>25.300</b>	<b>13.000.000</b>	<b>11.000.000</b>

**Tabla 5: Producciones de litio y reservas mundiales (cálculos propios después de [Usgs09], [Usgs11]).**

Consultores de la industria estiman que la producción máxima final de litio de las actuales fuentes (no incluyendo Bolivia) es de aproximadamente 200 toneladas al año [Deutsche08]. A pesar de que es factible producir en Bolivia, hay algunos problemas, entre ellos la lejanía de la ubicación, la altura (que afectan a las tasas de evaporación), el alto contenido de magnesio (que afectan las tasas de recuperación de litio), y la inestabilidad política. El Gobierno boliviano anunció hace tiempo sus planes para desarrollar los recursos del litio, pero está tratando de ir de manera independiente (sin asistencia empresa privada) y su objetivo es producir aproximadamente 60.000 toneladas al año, al comienzo de la producción en 2013, con potencial para un aumento significativo a partir de entonces.

En base a las proyecciones de producción de baterías de iones de litio para el sector del automóvil, y las hipótesis de crecimiento para otros mercados donde también se utiliza (como los móviles, ordenadores portátiles, etc.), se piensa que la demanda de litio podría superar las 200.000 toneladas en el 2017 [Deutsche08]. Como se ha indicado, uno de los principales países con reserva de litio es Bolivia, pero debido a su inestabilidad política, su capacidad de producción es una incógnita. Si la producción boliviana va en línea a la mundial (que todavía no ha sido así), se piensa que los suministros se pueden convertir en un problema en 2030, asumiendo un crecimiento del 7% anual en la demanda de la electrónica de consumo y otros usos actuales. Las

desventajas económicas de Bolivia, así como la demanda en rápido crecimiento en general, probablemente conducirán a nuevos aumentos en el precio del litio a medio plazo.

No obstante, también se espera que aproximadamente en 2017, se hayan descubierto nuevos yacimientos de litio para poder explotar [Deutsche08], así como nuevas tecnologías para permitir la extracción del litio de otras fuentes.

Otro punto clave a tener en cuenta es la necesidad del reciclado de este material a gran escala, para minimizar los riesgos de desabastecimiento de litio. Si fuera posible reciclar el litio de las baterías al final de su vida en un material que pudiera ser utilizado en las baterías nuevas, el problema del agotamiento de litio podría ser mitigado. Aunque no existen datos en este momento para indicar que esto pueda ser posible, investigadores de CSIRO en Australia han desarrollado un concepto para un mejor proceso de extracción para recuperar y purificar el cobalto y litio de las baterías [Berr08]. Por otra parte existe una directiva de la Unión Europea (2006/66/CE) respecto al reciclado de las baterías en la que se ofrecen tasas de reciclado de baterías de ion litio de un 12,5% en el año 2012 y un 22,5% en el año 2016 [Blesl09]. No obstante, en la actualidad las técnicas de reciclaje de las baterías no sólo de litio, sino también de NiCd, y NiMH se encuentran todavía en su infancia. Sin embargo, recientemente se ha empezado a trabajar hacia este tipo por parte de programas individuales de ciertas empresas, y por parte de grandes consorcios. Por otra parte, la Comisión Europea de Reciclaje de Baterías (EBRA) ha reconocido la necesidad de trabajar hacia un sistema de desmontaje de baterías avanzado, eliminado y reciclaje de la misma. Se ha producido una “Carta del reciclaje de la batería y de los acumuladores”, cuya finalidad es asegurar a todos las partes interesadas en el sector (fabricantes de pilas y acumuladores, los fabricantes de electrodomésticos, autoridades locales, comerciantes, etc) que las baterías usadas y acumuladores serán tratados en condiciones satisfactorias en cuanto a protección del medio ambiente se refiere [Ipts05]. De hecho, se tiene tanta esperanza en el sistema de reciclaje que la previsión es que en el año 2050, la mayoría de la demanda de Estados Unidos de baterías pueda ser cubierta con el reciclaje tal y como se muestra en la figura [Electrification09].

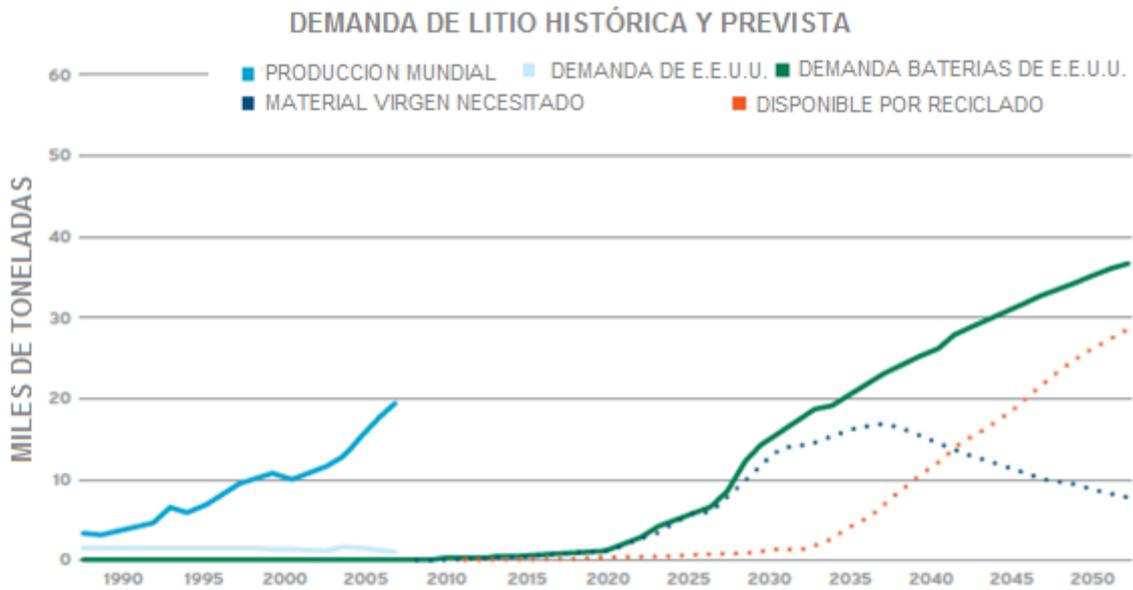


Figura 15: Previsión de demanda de litio en EE.UU. hasta el 2050 [Electrification09].

Con estos datos, se puede considerar que en los próximos años y principalmente en el periodo temporal del estudio que abarcará hasta el año 2020, el litio seguirá siendo una fuente viable y relativamente abundante de energía para automóviles, por lo que no se incluirá ninguna relación con el litio en el modelo a estudiar.

Una vez que se ha determinado el tipo de batería que se ha empleado en el estudio, se puede determinar el modelo del bloque que se muestra a continuación:

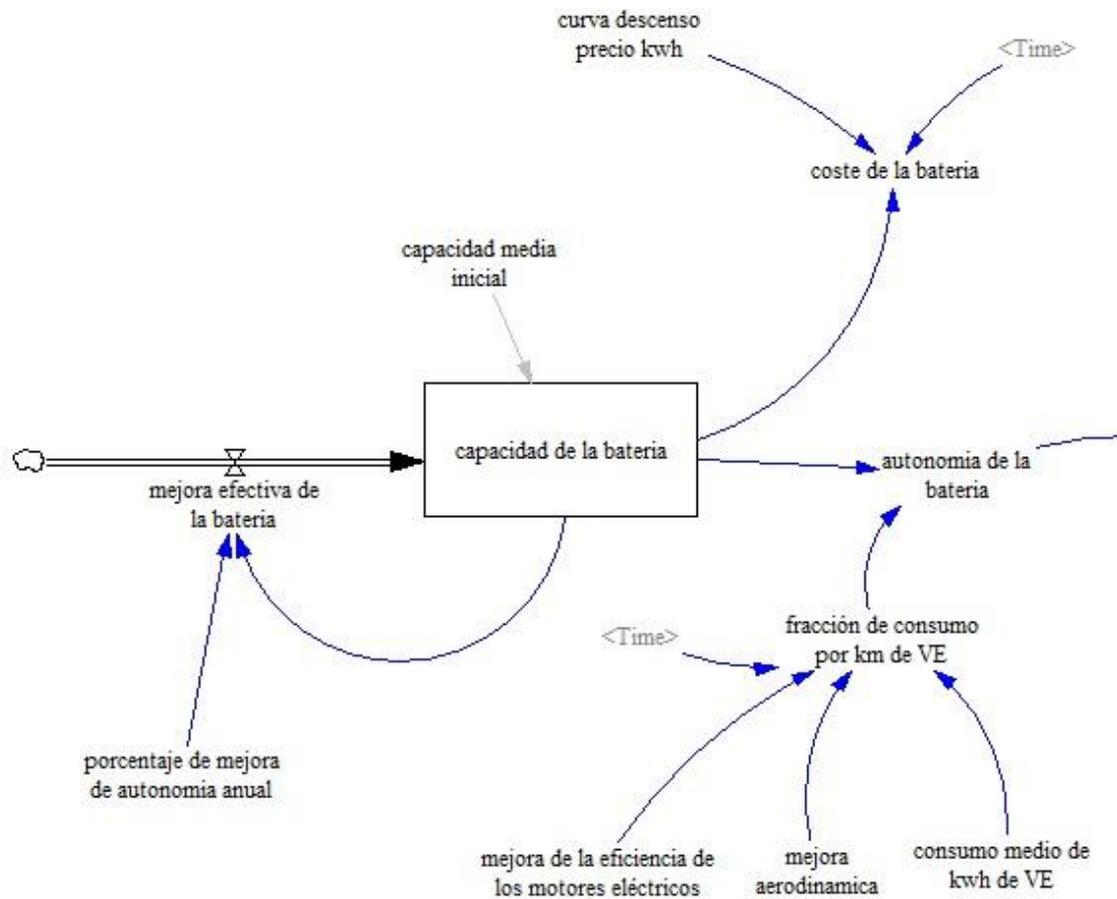


Figura 16: Modelo de la evolución de la capacidad de la batería.

Existe un único stock que irá contabilizando la capacidad de la batería que se vaya consiguiendo con los avances tecnológicos existentes. Puede llegarse a pensar que el valor lógico del stock debería ser la capacidad de la batería por unidad de peso o por unidad de volumen es decir, valores como la densidad de energía o la densidad de potencia. Sin embargo, para el resultado del modelo se ha considerado que es más significativo el valor de la capacidad total que va a poseer el vehículo eléctrico. Esto es motivado por las características inherentes que poseen los diferentes tipos de baterías. Como se ha visto anteriormente, la densidad de energía y de potencia van a ser características del tipo de batería que se vaya a utilizar. Por tanto, en el momento que se ha seleccionado un tipo de batería de trabajo, esos valores permanecerán constantes (esto no es del todo cierto puesto que tendrán unas mejoras de dichas características con el paso del tiempo debido a las mejoras de las tecnologías, como se ha visto). Este es el motivo por el que se ha trabajado con la capacidad de almacenamiento de energía directamente en lugar de trabajar con capacidad por unidad de volumen o de peso.

Se ha partido de una capacidad inicial de la batería, basada en la capacidad media existente en la actualidad. Se ha tomado la media de los vehículos eléctricos existentes en el mercado en los años 2010 y 2011. Para esta consideración no se han contado con modelos de marcas como BYD y Tesla al ser casos aislados y poco significativos en el mercado español. Según esto, la capacidad inicial será de 22 kWh que coincide con modelos de vehículos eléctricos tales como el Fluence Z.E. de Renault [Renault] y es un valor medio de los vehículos eléctricos actuales en el mercado:

MODELO	BATERÍA (kWh)
Think City	25
Citroën C-Zero	16
Renault Fluence ZE	22
Ford Focus EV	23
Nissan Leaf	24

**Tabla 6: Comparativa de la capacidad de la batería en varios modelos actuales.**

Dicha capacidad inicial se verá incrementada de manera anual debido a los diversos avances que se esperan en el campo de las baterías, que son muchos, gracias a la producción masiva de este tipo de baterías y a los nuevos tipos de baterías que se están utilizando actualmente (como las baterías de iones de litio), así como nuevos tipos que puedan surgir. Se ha tomado un valor de un 2%, de mejoría anual de la capacidad de la batería, durante el periodo de tiempo de la simulación [Bandivadekar08] que está incluido en la variable “porcentaje de mejora de autonomía anual”.

Según esto, el modelo es relativamente sencillo puesto que está compuesto de un único stock que se irá incrementando a medida que pasan los años como consecuencia de las mejoras de las tecnologías de las baterías.

*mejora efectiva de la batería=*

*capacidad de la batería\*porcentaje de mejora de autonomía anual*

Una vez que se ha indicado la capacidad inicial de las baterías del modelo y el tipo de batería utilizada se puede determinar si los datos incluidos en el estudio son correctos o no mediante un cálculo muy simple. En la tabla 2 [Kalhammer07] se han

recogido las principales características que debe poseer una batería para un vehículo eléctrico. Dentro de ellas hay una que se puede utilizar como un primer control de datos: el peso máximo que es de 250 kg. Al comparar este valor con la densidad de energía que poseen las baterías de iones de litio que es de 75-120 Wh/kg se puede obtener en los baremos en los que las capacidades de esta batería van a fluctuar para el vehículo eléctrico. Al multiplicar ambos valores se obtiene que según la densidad de energía de las baterías de litio, para un vehículo eléctrico la capacidad de dicha batería va a oscilar entre los 18,75 kWh y los 30 kWh. Teniendo en cuenta que el valor inicial de la batería determinado para el modelo es de 22 kWh se puede determinar que los valores adoptados para la simulación son adecuados.

Una vez determinado qué tipo de batería se va a utilizar y sus dimensiones, es necesario calcular el coste de la misma. Este será otro de los factores clave dentro del vehículo eléctrico, puesto que es el principal aumento en el precio de compra que el cliente final va a percibir (como dato, el coste de un vehículo eléctrico frente a uno convencional de características similares puede verse incrementado en 12.000 € por la batería aproximadamente). Para su cálculo es necesario además de conocer la capacidad de la batería, el precio que va a costar fabricar dicha batería, pero este precio lógicamente no va a ser fijo, y mucho menos en la época de la comercialización del vehículo eléctrico en la que se enmarca la investigación.

Hay varios factores que pueden conducir a que las baterías de iones de litio reduzcan su coste de manera considerable. Estos incluyen como primer y principal factor el aumento de los volúmenes de producción, pero también la transición a materiales alternativos de bajo costo, la mejora de los procesos de fabricación y la reducción de los circuitos de control externos [Anderman00]. En una producción de bajo volumen, los costos de la industria manufacturera dominan el costo de la batería de iones de litio. Como referencia, según se vio en la figura 7, el costo de producción disminuye casi tres veces de 50 mil a 2 millones de unidades. A alto volumen de producción (más de 100.000 unidades de baterías para el vehículo eléctrico, y más de 1 millón de unidades para el vehículo híbrido) el costo de los materiales se convierte en el elemento dominante. El USABC (U. S. Advanced Battery Consortium) reclama precios de la batería para el vehículo eléctrico de en torno a 150 \$/kWh [Kromer07], [Gaines00]

como criterio de comercialización. Este objetivo es claramente poco realista, si no existe un gran avance en la reducción de los costos de los materiales.

Respecto a las posibles evoluciones de los precios de las baterías, existe numerosa literatura con valores relativamente próximos entre sí, pero que difieren en mayor o menor medida. En la siguiente tabla se puede resumir las proyecciones de los estudios más importantes realizados.

ESTUDIO	PRECIO (\$/kWh)	PLAZO
European Storage Battery Manufacturers [Eurobat05]	296	2020
Argonne National Laboratory (ANL) [Gaines00]	250	Futuro
International Energy Agency (IEA) [Berr08]	270	Futuro
Electric Power Research Institute (EPRI) [Duvall05]	280	Futuro
California Air Resources Board (CARB) [Kalhammer07]	240-280	Futuro
Battery Technology Advisory Panel (BTAP) [Anderman00]	270	Futuro

**Tabla 7: Proyecciones de coste de kWh según los estudios más importantes.**

Es evidente que existe una brecha entre las proyecciones de precios a largo plazo y los precios de 2010 de alrededor de 600 \$/kWh [Ing11]. Sin embargo, existe un cierto optimismo de que, hacia el final del período cubierto por este estudio, los precios para las baterías de iones de litio disminuirán hacia las proyecciones aspiracionales de la tabla anterior. Sin embargo, en el plazo más cercano hay menos certeza de que su precio bajará considerablemente y mucho menos para alcanzar los valores inferiores a los 300 \$/kWh. Sin embargo, sí que se prevé llegar a una valor inferior a los 300 \$/kWh en un futuro teniendo en cuenta que los precios de las baterías utilizadas en los móviles o portátiles actualmente están por esa cantidad.

Si bien es cierto que, como se ha dicho anteriormente, el coste de las baterías, y su descenso va a estar muy ligado al aumento de los volúmenes de producción y con las demás mejoras previstas analizadas anteriormente. La tendencia del descenso previsto de los costos de producción de las baterías iones de litio con un mayor volumen de producción refleja las “curvas de experiencia” que se citan a menudo para otras tecnologías avanzadas tales como las células de combustible y los sistemas fotovoltaicos.

Las curvas de experiencia argumentan que un aumento en el volumen de producción obtiene un descenso previsible de los costes unitarios de producción, debido a factores como las mejoras en la eficiencia del trabajo, la estandarización de la producción y optimizaciones de la misma. Cuando los niveles de producción aumentan, el número de horas de trabajo se reduce. Además de las curvas de experiencia, se está trabajando con diversas metodologías para reducir los costos de implantación de nuevas tecnologías como son los aprendizajes por investigación que permiten reducir los costes de I+D+i [Köhler06], [Kahouli08]. A continuación se puede ver la forma convencional de la representación gráfica de la curva de aprendizaje.

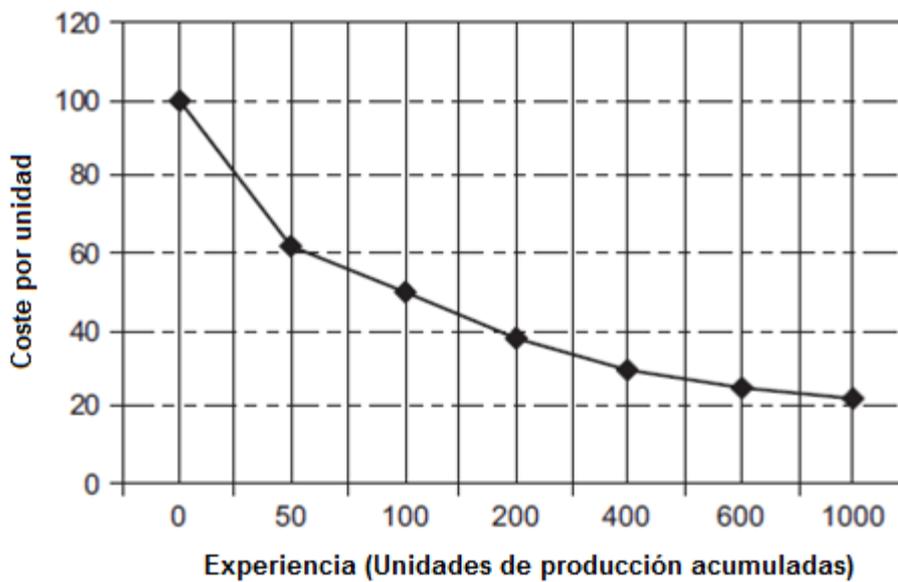
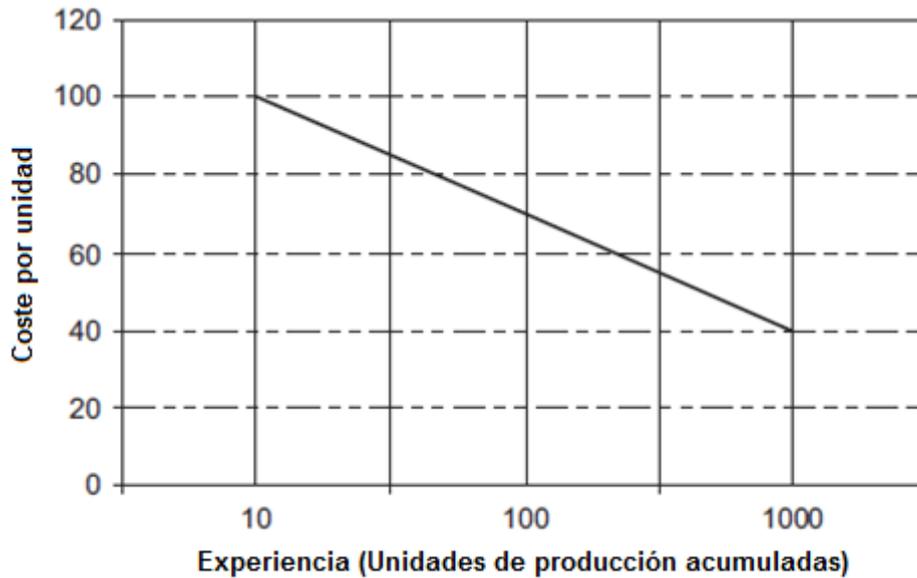


Figura 17: Curva de aprendizaje convencional [Kahouli08]

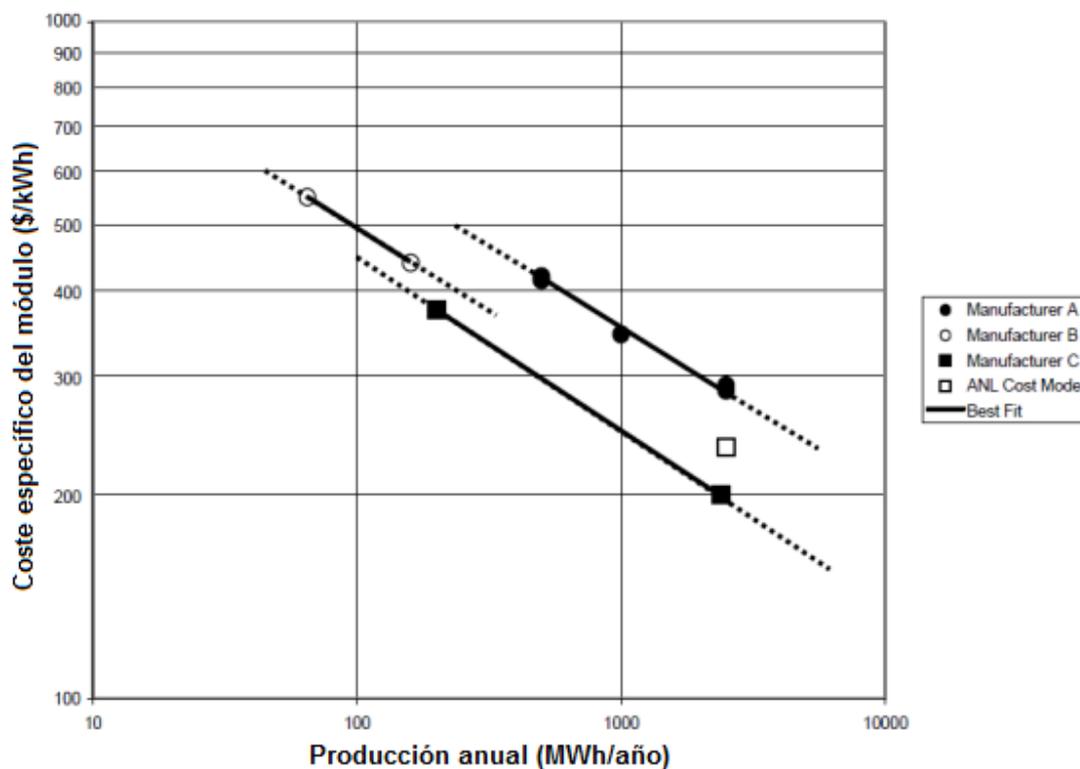
Dicha curva típica si se pasa a una escala logarítmica doble, se convierte en una línea recta.



**Figura 18: Curva de aprendizaje convencional en escala logarítmica [Kahouli08]**

La forma lineal decreciente en la escala logarítmica de la curva de aprendizaje refleja el nivel de disminución del costo de una determinada tecnología cuando la producción acumulada se duplica. Sin embargo, no hay que precipitarse a la interpretación de que cada vez se puede esperar un menor coste. De hecho, con cada duplicación de la capacidad acumulada, la disminución de costos obtenido es menor que en el caso anterior. Además, cada duplicación de la nueva capacidad acumulativa es más difícil de obtener con el tiempo a medida que la tecnología se acerca a su madurez y los mercados están más saturados [Barreto04].

En la siguiente gráfica se puede observar el estudio realizado por el Air Resources Borrad [Kalhammer07] en que se ha analizado con varios fabricantes de baterías de iones de litio, de qué manera pueden variar sus costes de venta en función de su producción.



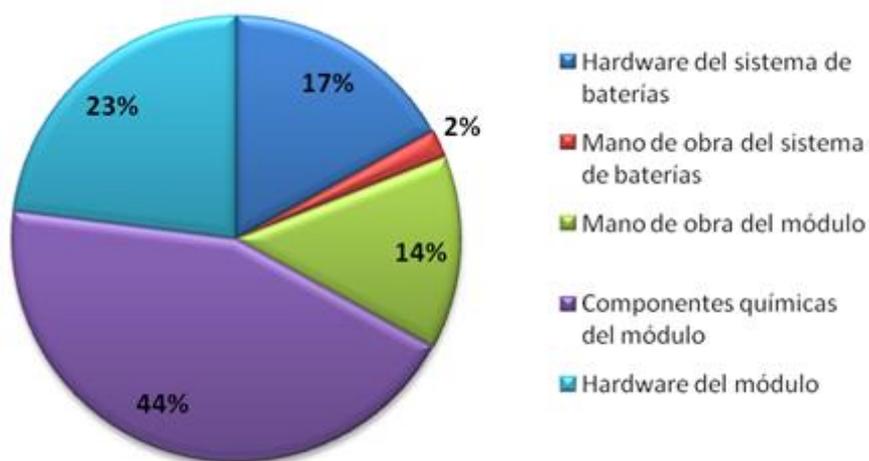
**Figura 19: Variación del coste de los módulos en función de su producción en varios constructores [Kalhammer07]**

En la figura se indica una propagación sustancial de los costes específicos del módulo en los diferentes fabricantes. Estas variaciones se deben a diferencias en los materiales actualmente utilizados y métodos de fabricación, así como a diferentes suposiciones hechas en cuando los costos de material y de fabricación.

Aplicando este razonamiento, se afirma a menudo que el costo unitario de la producción se reduce en un 20% por cada duplicación del volumen de producción (por ejemplo, el precio unitario de los sistemas fotovoltaicos en los EE.UU. disminuyó cinco veces entre 1976 y 1992) [Berr08]. Sin embargo, la experiencia en la energía fotovoltaica también muestra que proyectar las futuras reducciones de costes simplemente sobre la base de las curvas de experiencia está llena de dificultades, ya que no se toman en cuenta las intervenciones del mercado local, ni pueden predecir el efecto de los avances de la tecnología. En cuanto a las baterías, las curvas de experiencia se aplican principalmente a las células, donde hay capacidad para la optimización de la producción mediante la automatización manteniendo la calidad del producto. Está claro que la reducción de costes para las células se producirá con la producción en masa,

basándose en la experiencia de la fabricación de células para aplicaciones de consumo. No obstante, la transición de la producción en masa para el sector de la automoción de baterías de iones de litio ya ha comenzado.

En la siguiente figura se puede ver el coste de fabricación desglosado de los componentes de una batería de iones de litio [Duvall05], [Berr08].



**Figura 20: Reparto de los costes de los componentes de una batería de iones de litio [Duvall05]**

Los materiales necesarios para las funciones electromecánicas de las células de iones de litio, es el factor más importante que representa casi la mitad del costo final. En términos generales, el costo de los materiales se desglosa de la siguiente manera: material de los electrodos positivos alrededor del 40%, material de electrodos negativos alrededor del 10%, electrolito 25%, separador 25% [Duvall05]. Estos porcentajes se aplican a baterías de alta energía y son aproximados; el número exacto dependerá de los materiales específicos y el diseño de células utilizadas en la batería.

Como se puede ver, el elemento más significativo en el costo de una celda de iones de litio es el material del cátodo. Por lo tanto, otra fuente de reducción del coste no sólo será la optimización de los procesos de fabricación y el aumento de los volúmenes de producción sino también el estudio de nuevos materiales. Esto será cada vez más real, y de hecho ya se están estudiando otros metales como el cobalto, el manganeso o el hierro, para su utilización en el cátodo. La investigación en esta área es permanente, como la investigación en polímeros o electrolitos de gel, el ánodo y materiales nuevos para el separador. Cada uno ofrece su propio potencial de reducción

de costos que se hará evidente en el largo plazo, pero es poco probable que tenga un importante impacto a corto plazo.

La disminución de los costos de los materiales prevista [Kromer07] es de un 40% durante los próximos 20 años, con una tasa del 2,5% al año. Este supuesto se justifica por el hecho de que la mejora de la energía específica debería ligeramente traducirse en un mejor coste específico, ya que implica que menos material activo es necesario para alcanzar un mismo objetivo de funcionamiento.

En cuanto al valor del coste de las baterías y su evolución en el tiempo, se ha considerado una previsión estimada a nivel mundial. No se puede realizar como una parte retroalimentada de un bucle del modelo referenciado al número de vehículos eléctricos en las carreteras españolas puesto que el descenso del precio de las baterías no irá ligado a la producción de vehículos para España, sino que dependerá de la evolución del número de vehículos eléctricos en todo el mercado mundial. Según esto, y tras consultar numerosa bibliografía respecto al tema con diferentes resultados, para el cálculo del coste, se ha empleado una gráfica de la previsible reducción del precio por kWh que va a ocurrir en los próximos 10 años (escenario optimista). Para ello, se ha utilizado la siguiente información [Hensley09]:

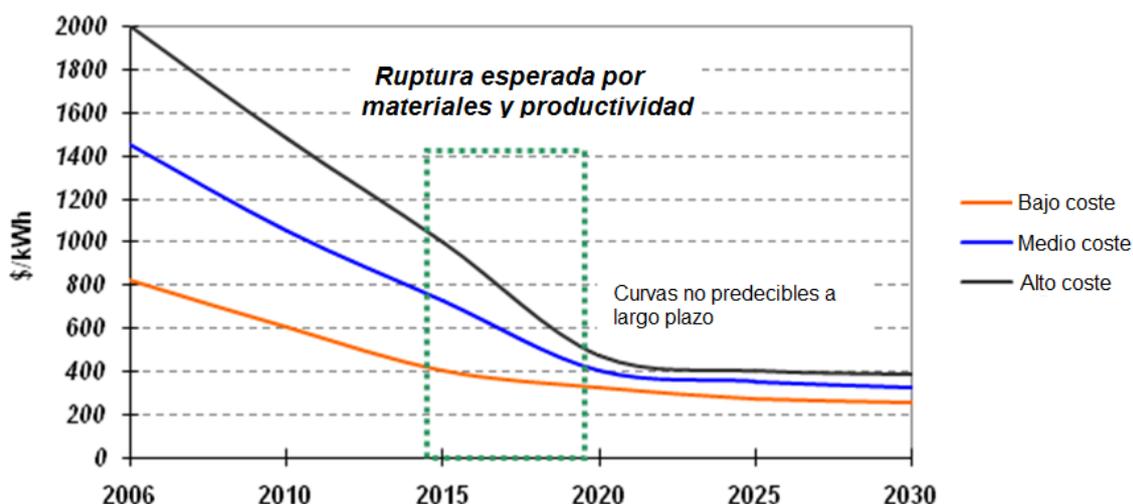
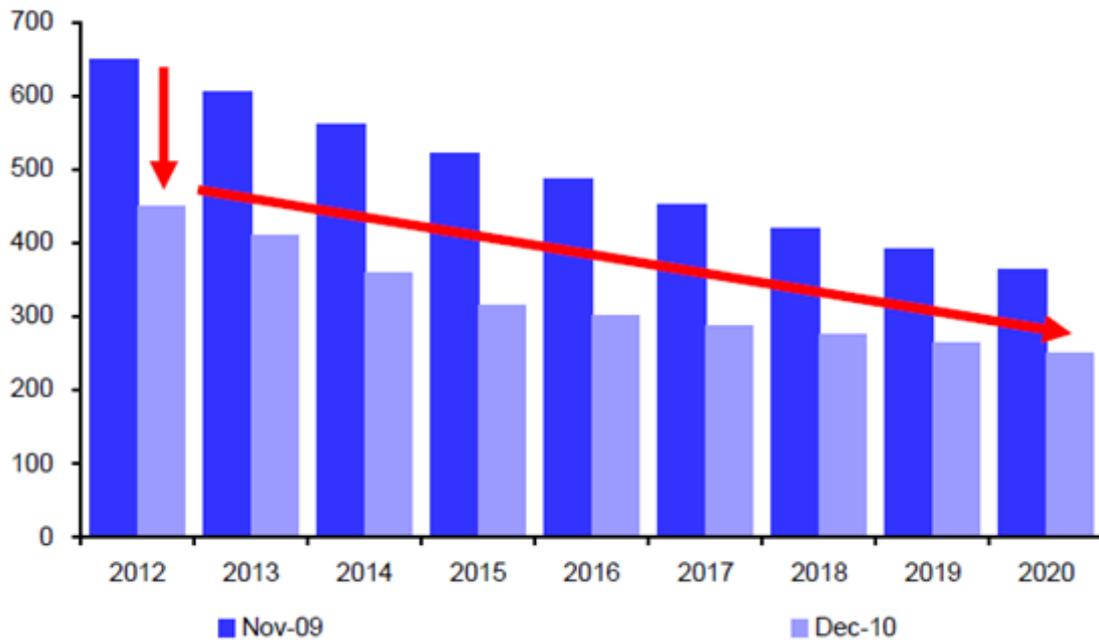


Figura 21: Escenarios de reducción del precio de la batería en los próximos años [Hensley09], [Guenther10].

Se ha seleccionado esta información y no otra ya que es la que tiene una mayor relación con los datos reales de precios existentes [Ing11], lo cual no implica que dicha estimación de cara al futuro sea correcta. De hecho, varios analistas van actualizando

sus predicciones a medida que avanza el tiempo [Deutsche08], [Deutsche10] lo cual dificulta enormemente obtener una previsión de costes realista. En el siguiente gráfico se puede ver un ejemplo [Deutsche10] de la actualización del coste de las baterías realizadas por el mismo consultor con una diferencia de un año. Se reduce en aproximadamente un 30% la previsión del coste de la batería que se realizó en noviembre de 2009 con respecto a la que el mismo consultor realizó en diciembre de 2010.



**Figura 22: Actualización del coste de las baterías por el mismo consultor en dos años consecutivos [Deutsche10].**

El siguiente gráfico muestra otra estimación realizada en otro estudio cuyo resultado final es similar al escenario optimista que se ha seleccionado [Electrification10b]. En esta figura se puede observar cómo la reducción del coste de las baterías está asociada a hitos industriales muy definidos.

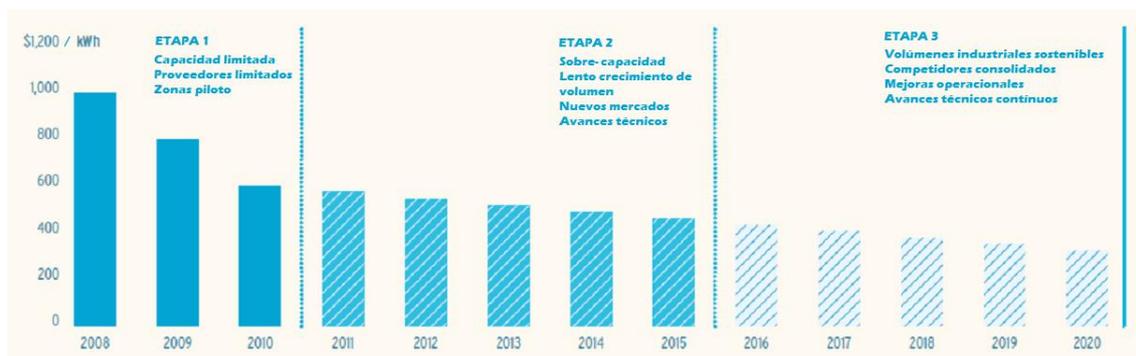


Figura 23: Curva de descenso del precio de la batería [Electrification10b].

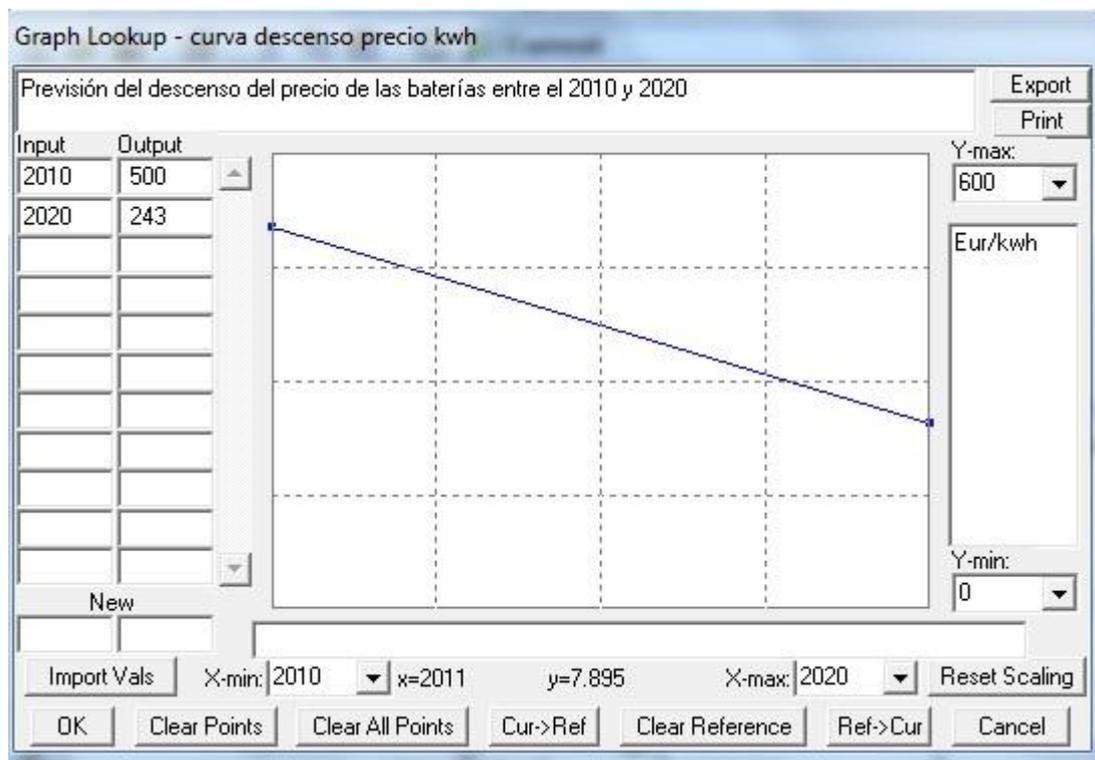
Según se puede observar en el gráfico que se ha tomado como referencia, existen varios escenarios del coste de las baterías, pero lo que sí que está bastante claro es que se prevé un descenso muy importante en el coste de las baterías.

Hasta ahora, el descenso del coste de las baterías ha venido dado por una disminución entre el 6% y el 8% anual [Hensley09]. Muchos analistas predicen que el precio seguirá cayendo en los próximos 10 años de igual manera debido al aumento en los volúmenes de producción (por ejemplo, Deutsche Bank [Deutsche10] habla de reducciones del 7,5 %).

Los datos de precios de las baterías en el año 2009 e inicio de 2010 eran de aproximadamente 650 \$/kWh lo que coincide aproximadamente con el escenario optimista de la gráfica mostrada [Deutsche10] y para el año 2012, la previsión existente es de aproximadamente 450 \$/kWh [Deutsche10]. Sin embargo, este último valor choca con las declaraciones realizadas por el CEO de Ford, Alan Mulally, en un foro de tecnología verde en California (Fortune magazine's Brainstorm Green conference) el 17 de abril de 2012 [Mulally12]. En dicha conferencia, Alan indica claramente que el coste que las baterías tienen para los vehículos de Ford es de entre 12.000 \$ y 15.000 \$, lo que implica un coste del kWh de entre 522 y 650 \$/kWh. Estos valores son mucho más coherentes con la realidad y no con las previsiones estimadas por el Deutsche Bank. Según esto, el dato tomado como base para 2010 es de 615 \$/kWh, mientras que el tomado como base para el año 2020 es de 300 \$/kWh, valores también muy similares a los indicados en el conglomerado de estudios realizado por ING [Ing11]. Al cruzar estos datos con la gráfica de los escenarios de reducción de costes, se puede ver que cuadra con el escenario más optimista, el del menor coste. Según esto, se toma como hipótesis más plausible el escenario más favorable, siendo prácticamente lineal el descenso del

coste por kWh previsto. Además, esta curva está perfectamente correlacionada con los valores económicos existentes hasta el momento.

De esta manera, el modelo utilizado es el mostrado en la gráfica siguiente (en euros).



**Figura 24: Curva de descenso del precio de la batería en el modelo en €/kWh.**

Al multiplicar el valor de la capacidad de la batería por el precio por kWh se ha obtenido el coste completo de la batería asociada al vehículo eléctrico en el tiempo.

No obstante, es importante recordar que esta estimación económica, no es más que eso, una estimación. Tal y como se ha descrito anteriormente, existe una gran incertidumbre de cómo van a evolucionar los precios de las baterías en función principalmente de la evolución de las ventas del vehículo eléctrico, así como de los nuevos procesos de fabricación.

Respecto a las baterías, existe una alternativa que está siendo ofertada por Renault [Renault] y es la de alquilar la batería en vez de comprarla. De esta manera el precio de compra del vehículo baja sustancialmente. En el caso del Fluence ZE, el alquiler de las baterías es de 82 €/mes, lo que anualmente implica un costo de casi 1.000

€ (en concreto 984 €). Si se analiza detenidamente se puede comprobar que a en largo plazo, este coste va a ser igual o superior que el coste de compra de las baterías, ya que se ha considerado una duración de las baterías de 15 años, lo que implicaría aproximadamente 15.000 € en alquiler de baterías. En el peor de los casos, el coste de las baterías influye en el coste compra del vehículo eléctrico en aproximadamente 11.000 € (puesto que son 500 € por cada kWh, teniendo en cuenta baterías de 22 kWh). Según esto, si bien es cierto que el alquiler de las baterías puede dar una imagen de compra del vehículo eléctrico mucho más barata que la de la compra del vehículo con las baterías, a término va a implicar un sobrecoste de cara al comprador siempre y cuando el vehículo eléctrico tenga una duración en su vida de utilización superior a los 11 años. Sin embargo, puede existir una cierta ventaja en este tipo de alquiler de baterías y es el posible deterioro que puedan sufrir las mismas, lo que no supondría coste alguno para el usuario. De cara al modelo de simulación, esta alternativa no se ha tenido en cuenta por varios motivos: el primero es que única y exclusivamente es Renault el fabricante de automóviles que oferta esta alternativa, mientras que el resto ni siquiera lo han planteado. El segundo motivo es la falta de diferenciación económica de ambas alternativas puesto que como se ha explicado anteriormente, si bien es cierto que el precio de compra del vehículo se reduce considerablemente con la modalidad de alquiler de baterías, esta opción va a incrementar notablemente los costes de utilización del vehículo, llegándose a equiparar a los 11 años de utilización del mismo. A la hora de calcular el periodo de amortización del vehículo eléctrico frente al convencional, el coste de las baterías va a estar incluido bien sea por la compra o por el alquiler de las mismas.

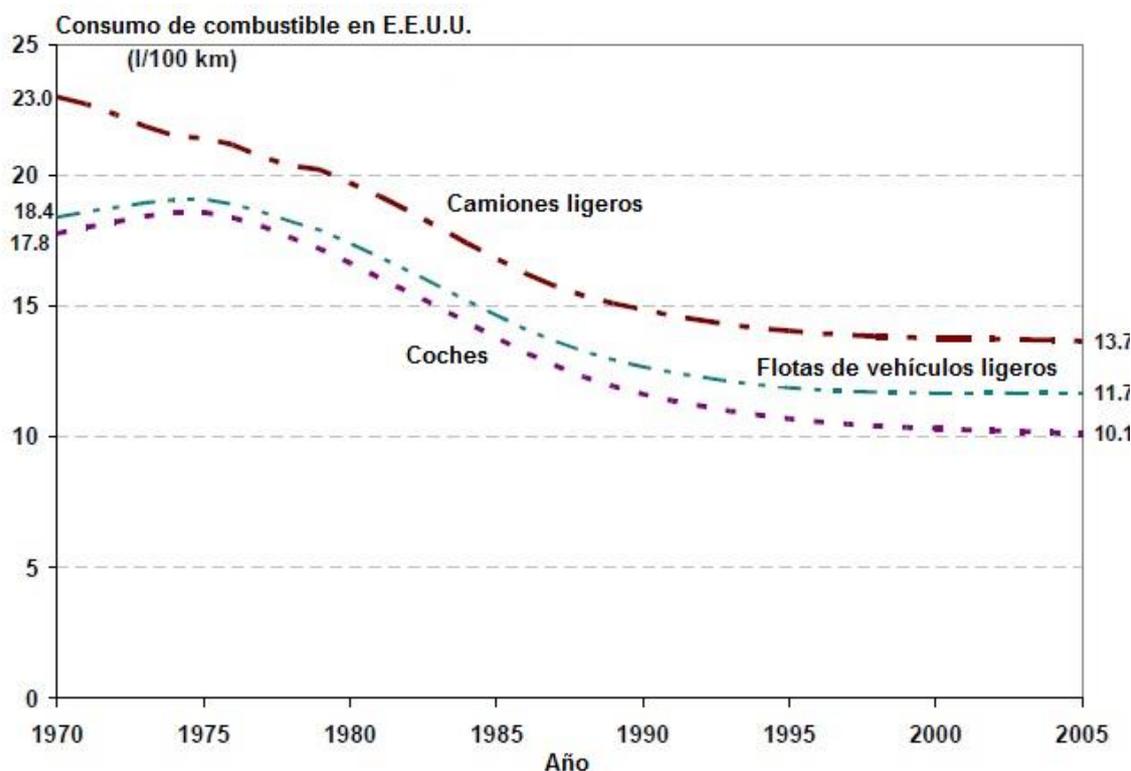
Una vez que se ha obtenido la capacidad de la batería y el coste de la misma, lo siguiente será determinar la autonomía que dicha batería va a proporcionar al vehículo eléctrico. Lógicamente, la autonomía de la que el vehículo eléctrico va a poder disponer dependerá de la capacidad de la batería, pero también del consumo que el vehículo tenga. En cuanto al consumo del vehículo eléctrico, también se ha tomado una media entre los modelos existentes cuyo valor es de 13,55 kWh/100 km.

<b>Vehículo eléctrico</b>	<b>Consumo medio</b>
Renault Fluence ZE	13,75 kWh/100 km
Renault Zoe	12,97 kWh/100 km
Renault Kangoo	12,94 kWh/100 km
Nissan Leaf	13,71 kWh/100 km
Ford Focus EV	14,375 kWh/100 km

**Tabla 8: Consumos medios de los principales vehículos eléctricos.**

Este valor también está muy próximo al consumo medio del Fluence Z.E. que es de 13,75 kWh/100 km [Renault], por lo que se ha asumido que los datos de partida tomados son correctos y que el vehículo eléctrico modelo de la simulación es el Renault Fluence Z.E.

No obstante, este consumo medio indicado corresponde a una situación inicial, pero al igual que se prevén mejoras en los motores de combustión interna, es de esperar mejoras en la eficiencia de los motores eléctricos. Puesto que todavía no están bien definidas las mejoras que se van a poder conseguir, es necesario estimarlo, pero teniendo en cuenta que la simulación se encuentra en el inicio de la comercialización el vehículo eléctrico, es de esperar importantes mejoras en la eficiencia al igual que pasó con el vehículo convencional desde los años 70 hasta la actualidad. A continuación se puede observar un gráfico de la evolución del consumo medio de los vehículos convencionales en los EE.UU. en las últimas décadas [Bandivadekar08].



**Figura 25: Tendencias de consumo de combustible en las últimas décadas en EE.UU.**  
[Bandivadekar08].

Al analizar las curvas, se puede llegar a aproximar la posible evolución que va a existir. Es poco probable que se obtengan avances tan espectaculares como los que se tuvieron en la década de los 70, pero sí cabe esperar una mejoría similar a la existente entre 1985 y 1995. Según esto, se ha asumido una disminución de consumo de los motores eléctricos de un 2% anual [Bandivadekar08]. Esto es lo que se ha recogido en la variable denominada “Mejora de la eficiencia de los motores eléctricos”.

Asimismo, además de la propia mejora de los motores, están previstas ciertas mejoras en elementos comunes del coche, con independencia de la tecnología motriz que se emplee. Dentro de estos avances, los dos más importantes a esperar están centrados en la aerodinámica y en la reducción del peso del vehículo. En cuanto al vehículo eléctrico, no se va a considerar la reducción del peso, puesto lo que ocurre es el efecto inverso, es decir, se está aumentando el peso del vehículo a incorporar las baterías, y analizando estimaciones de peso para el año 2030 [Bandivadekar08], son muy similares al peso actual del Fluence Z.E. [Renault].

En cuanto a la mejora aerodinámica, se espera que la mejora del diseño implique una mejora en el coeficiente de resistencia aerodinámica. Pese a que se puede pensar que los diseños actuales de vehículos son bastantes sofisticados, existen todavía mejoras significativas a esperar, puesto que existen prototipos con coeficientes de resistencia aerodinámica incluso un 30% inferior a los existentes en la actualidad. Para este estudio, se ha considerado una reducción del coeficiente que implica una reducción del consumo del vehículo (bien sea eléctrico o de combustión interna) de un 1%, lo cual está recogido en la variable “mejora aerodinámica” [Bandivadekar08].

En este momento se han obtenido las tres variables que van a modelar el consumo del vehículo eléctrico: el consumo medio del vehículo eléctrico, la mejora de la eficiencia de los motores eléctricos, y la mejora aerodinámica.

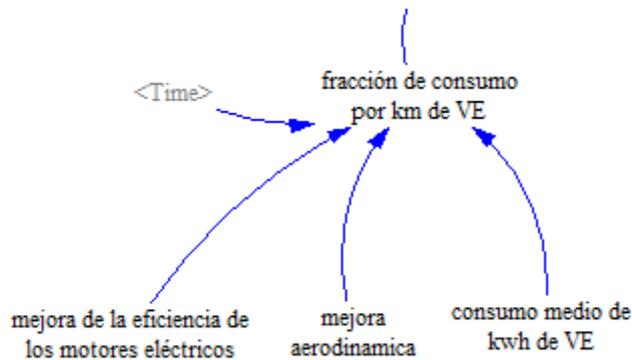


Figura 26: Modelado del consumo del vehículo eléctrico.

Al relacionar las 3 variables se obtiene la evolución del consumo a lo largo de toda la simulación siendo la unidad los kWh que son necesarios para que el vehículo eléctrico pueda recorrer 100 km. Al invertir este resultado y dividirlo por 100, se obtiene cuántos kilómetros es capaz de recorrer el vehículo eléctricos por cada kWh de la batería. Este resultado está almacenado en la siguiente variable

$$\text{fracción de consumo por km de VE} =$$

$$1/(\text{consumo medio de kWh de VE} * \text{mejora de la eficiencia de los motores eléctricos}(\text{Time}) * \text{mejora aerodinámica}(\text{Time}))$$

Con los datos que se han trabajado, la evolución en el tiempo de los kilómetros que el vehículo eléctrico puede recorrer por cada kWh es la que se muestra en la figura.

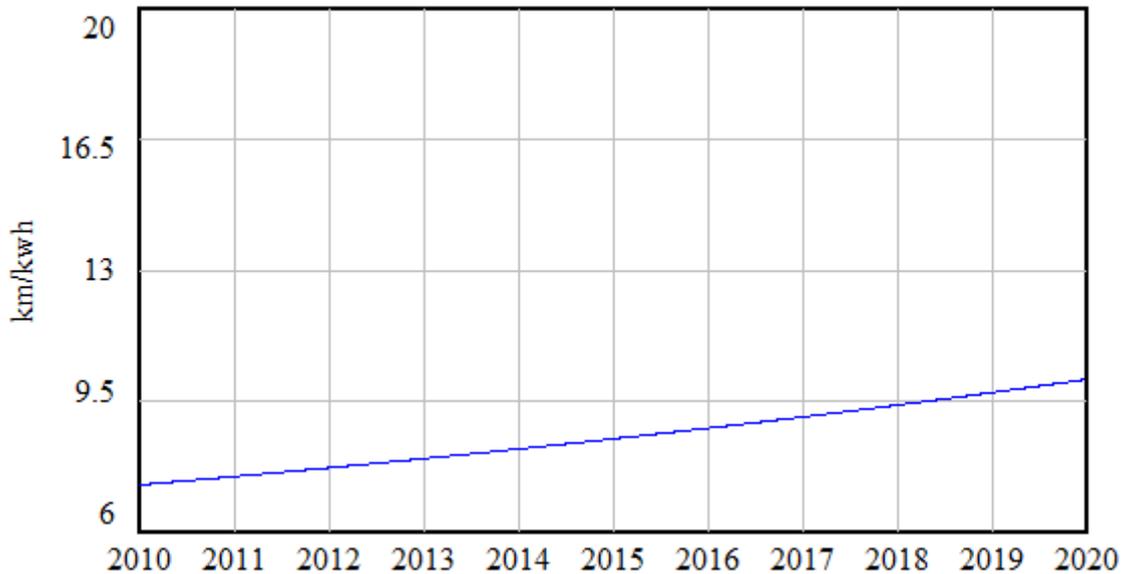


Figura 27: Evolución de los kilómetros que un vehículo eléctrico puede recorrer por cada kWh.

Al multiplicar este dato por la capacidad de la batería, se obtiene la autonomía en kilómetros del vehículo eléctrico medio, dato que será utilizado posteriormente para el cálculo de la demanda del vehículo eléctrico.

Una vez que los valores principales del bloque, tales como la autonomía y el coste de la batería, están calculados se puede pasar a calcular el resto de variables del bloque.

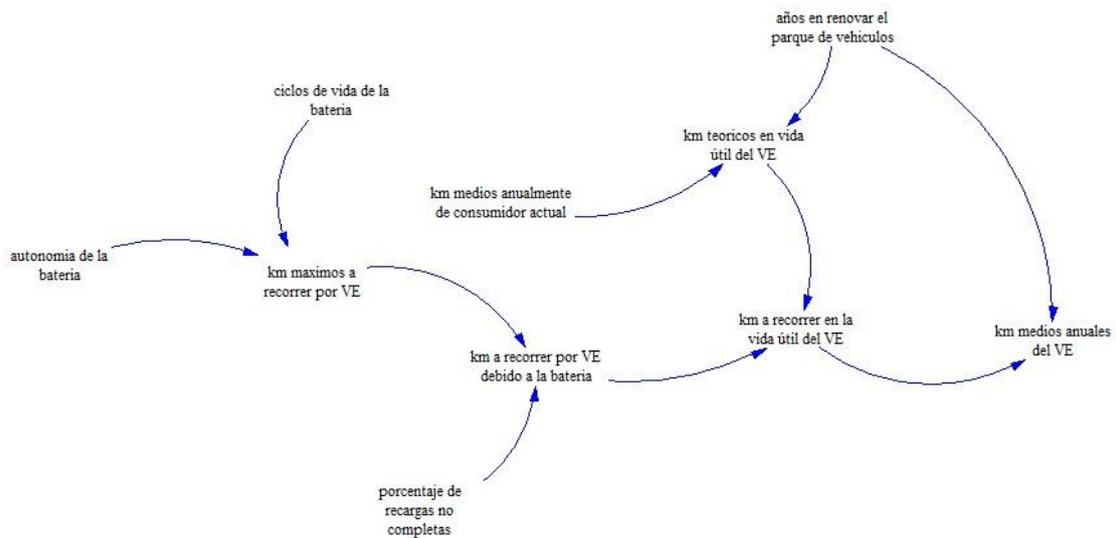


Figura 28: Modelado de los kilómetros a recorrer anuales por el vehículo eléctrico.

Para el resto de variables, se toma como dato de partida la autonomía de la batería anteriormente calculada.

De cara a poder determinar la duración que una batería va a tener a lo largo del tiempo, existen dos parámetros importantes que son la vida útil de la batería, y los ciclos de vida.

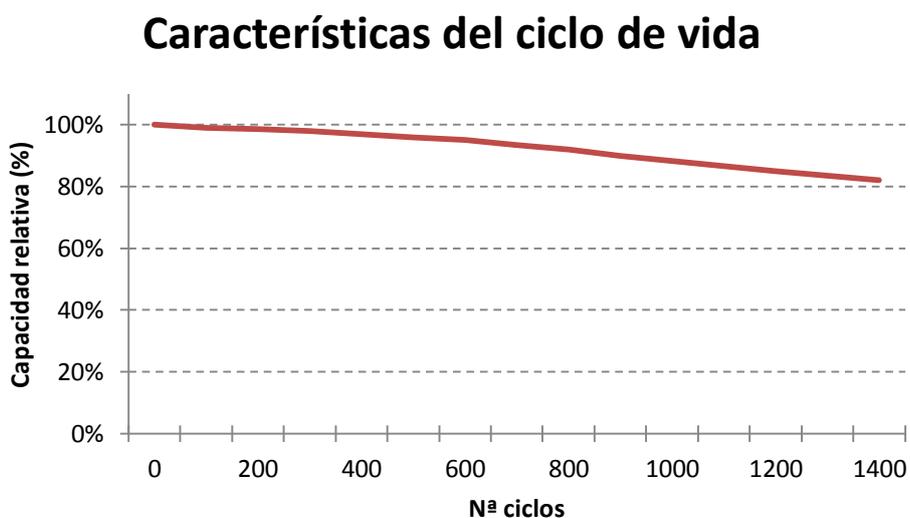
La vida útil de la batería es la capacidad de la batería para limitar la degradación de la misma a lo largo del tiempo independientemente de la frecuencia de la carga y de la profundidad de la carga o descarga que se realice [Axsen10]. Las baterías también pueden deteriorarse a través de reacciones químicas indeseables entre los materiales de la célula de la batería. El efecto general de estas reacciones es degradar uno o más de los componentes funcionales de la célula y por lo tanto la capacidad de almacenamiento de energía de la batería y/o el rendimiento de potencia máxima. Los procesos de degradación de la batería son específicos para el tipo de la batería y los materiales utilizados en ella. Tienden a ser complejos y su control a través de la elección de diseños apropiados, los materiales y el funcionamiento es casi siempre difícil. Según los estudios consultados, este factor no es limitante en el caso del vehículo eléctrico puesto que los valores son de aproximadamente 15 años [Axsen10], [Kromer07], [Pesaran07], que coincide con el valor fijado para renovación del vehículo, por lo que este dato no se considerará para la simulación. Este valor es muy superior al preconizado por la USABC en cuando a vida útil necesaria para una batería adecuada para un vehículo eléctrico fijada en 10 años [Kromer07], [Gaines00].

El segundo dato de interés a tratar es el ciclo de vida de una batería. Todas las baterías se deterioran a lo largo de su funcionamiento debido a las variaciones acumuladas de la estructura y composición de los principales componentes de las baterías (las células), causado por los ciclos de carga y de descarga de la misma. El ciclo de vida de la batería consiste en el número de ciclos que suceden antes de que el rendimiento de la batería se haya degradado hasta un nivel predeterminado. Este valor es una medida de la capacidad de la batería para minimizar o soportar estos cambios. El requisito clave para el ciclo de vida de las baterías eléctricas del vehículo es que conserven una alta proporción (generalmente se toma un 80%) de su potencia original y las capacidades de suministro de energía durante la vida del propio vehículo.

Las baterías para los vehículos eléctricos, deben ser capaces de ofrecer un gran número de descargas profundas para maximizar los kilómetros que el vehículo podrá realizar con la batería durante su vida útil, y deben tolerar el mismo número de cargas completas.

Según esto, una batería contiene una capacidad inicial, sin embargo, a medida que se va cargando y descargando varias veces, dicha capacidad se va reduciendo gradualmente. De manera general, se va a considerar que el ciclo de vida de la batería es el número de cargas y descargas que se pueden efectuar en una batería hasta que la capacidad de la misma se reduce al 80% de la inicial. No obstante, esto no significa que una vez cumplidos estos ciclos de carga y descarga, la batería no sea útil, sino que la capacidad de la batería se verá reducida, pero sigue funcionando correctamente.

En la figura mostrada a continuación se puede observar el ejemplo de un ciclo de vida típico en una batería.



**Figura 29:** Capacidad de una batería en función de los ciclos de vida.

Se puede ver cómo se va degradando la capacidad de la batería a medida que se van realizando ciclos de carga y de descarga.

En el caso particular de las baterías de los vehículos eléctricos, el funcionamiento es idéntico. El valor del número de ciclos posibles a efectuar, se ha considerado 2.200, puesto que es el dato más comúnmente aceptado en la mayoría de

los estudios realizados, [Graham01] pese a que en varios estudios [Deutsche08], [Aksen10], [Pesaran07] se superan ampliamente. No obstante, se ha considerado importante reiterar que pese a cumplir los 2.200 ciclos de carga, no quiere decir que la batería deje de funcionar, sino que su capacidad se verá reducida por debajo del 80% de su capacidad inicial. Al igual que pasaba con la vida útil, este valor es muy superior al preconizado por la USABC que indica un objetivo de 1.000 ciclos para una batería adecuada para el vehículo eléctrico [Kromer07], [Gaines00]. Para este dato no se han tenido en cuenta valores como los de las baterías BYD [Laboratorio09] en los que se hablan de 5.500 ciclos, puesto que al igual que ocurría con la capacidad de la batería, son casos aislados y muy poco representativos del mercado español.

Con estos datos, se puede calcular el número de kilómetros que el vehículo eléctrico podría recorrer suponiendo que todas las cargas de la batería fueran completas. Este valor se obtiene al multiplicar la autonomía por el número de ciclos de vida, valor que se almacena en la variable “km máximos a recorrer por VE”. Este dato es el número máximo teórico de kilómetros que el vehículo eléctrico podría recorrer con la batería, contando que le cliente al llegar al fin de los ciclos no utilizara más la batería, pero como se ha explicado no tendría por qué ser de esa manera sino que podría seguir utilizándola aunque con un deterioro de sus características.

No obstante, es poco probable que todas las recargas que se realicen sean completas, ya que en ciertas ocasiones, puede suceder que el usuario necesite algo de carga para poder llegar hasta su garaje y allí cargarlo completamente, por lo que se introduce un factor de corrección en el que se estima que el 25% de las cargas que el usuario realice a lo largo la vida útil del vehículo no serán recargas completas. Con esta corrección se obtiene la variable “km a recorrer por VE debido a la batería” que son los kilómetros máximos que se podrían recorrer en el ciclo de vida de la batería.

No obstante, se han calculado los kilómetros máximos, pero esto no implica que el usuario vaya a realizar esta cantidad. Para determinar los kilómetros totales, habrá que determinar si se va a alcanzar el máximo permitido por la batería, o si por el contrario, por su propia situación, el usuario final va a realizar menos.

Para calcular esta cifra, es necesario remitirse a los hábitos del conductor actual. En la actualidad, de media un conductor realiza 20.000 kilómetros anuales

[Cee09]. Si la tasa de renovación del parque de vehículos es de aproximadamente 15 años [Bandivadekar08], [Vyas97], multiplicando ambos datos se obtiene que un conductor actual de media, realiza en la vida útil de un vehículo aproximadamente 300.000 kilómetros, dato almacenado en la variable “km teóricos en vida útil del VE”. Según este dato, un conductor de un vehículo eléctrico recorrerá en la vida útil de su vehículo 300.000 kilómetros, siempre y cuando la batería que es el elemento limitador se lo permita. Para determinar cuál de los dos es el valor correcto, hay que tomar el mínimo valor entre ambos puesto que será el más restrictivo, lo que da como resultado la variable

*km a recorrer en la vida útil del VE=*

*MIN(km a recorrer por VE debido a la batería, km teóricos en vida útil del VE )*

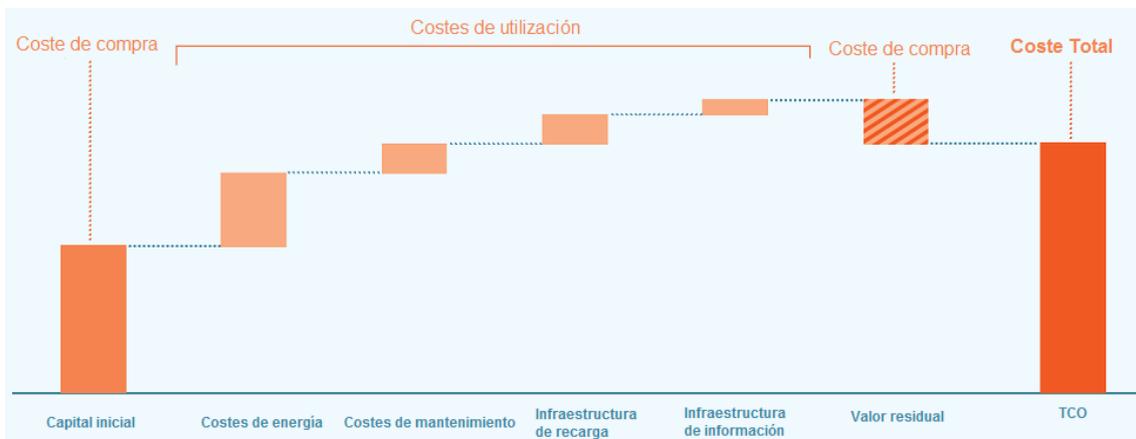
Una vez calculados los kilómetros a recorrer en la vida útil del vehículo eléctrico, bien sean por agotamiento de la batería o bien por cambio de vehículo, sólo falta calcular el número medio de kilómetros anuales que va a realizar un vehículo eléctrico, que se obtiene al dividir el número de kilómetros totales entre los años que se tarda en renovar el vehículo que como se ha mencionado con anterioridad es de 15 años, obteniendo la variable “km medios anuales del VE” que posteriormente será utilizada en varios bloques.

## **5.4 Bloque de costes del vehículo eléctrico**

En este bloque del modelo, se ha pretendido analizar y comparar los costes del vehículo eléctrico y los costes del vehículo convencional, tanto en el momento de la compra por parte del cliente, como durante la vida útil del vehículo. Para ello, se han tenido en cuenta datos como evolución de los precios del petróleo y de la electricidad, costes de mantenimiento, etc.

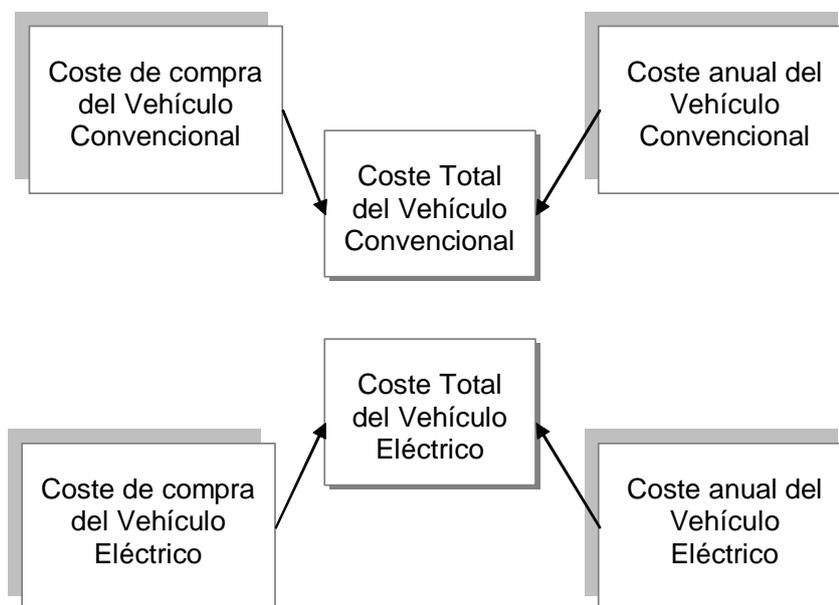
Para poder analizar la eficiencia económica de ambos tipos de vehículos se va a utilizar un indicador financiero denominado “Coste total de propiedad” (*TCO*, Total Cost of Ownership). Este indicador, trata de ayudar a los clientes potenciales a determinar los costes directos e indirectos de un producto, obteniendo una rápida justificación económica. El TCO describe los costes de adquisición de un producto,

pero también analiza los costes de operación del producto a lo largo de su vida útil. En la siguiente figura se puede observar una ilustración genérica de lo que consiste el TCO.



**Figura 30: Ilustración de los costes que comprenden el TCO [Electrification10b].**

Este bloque se ha dividido para obtener una mejor comprensión en 4 sub-bloques: el coste del vehículo eléctrico a la hora de la compra, el coste del vehículo eléctrico por su utilización, el coste del vehículo convencional a la compra, y el coste del vehículo convencional durante su uso. En la figura se puede ver un sinóptico del funcionamiento general del bloque.



**Figura 31: Sub-bloques principales del modelo de costes del vehículo eléctrico.**

### ***Sub-bloque de Coste de compra del vehículo convencional***

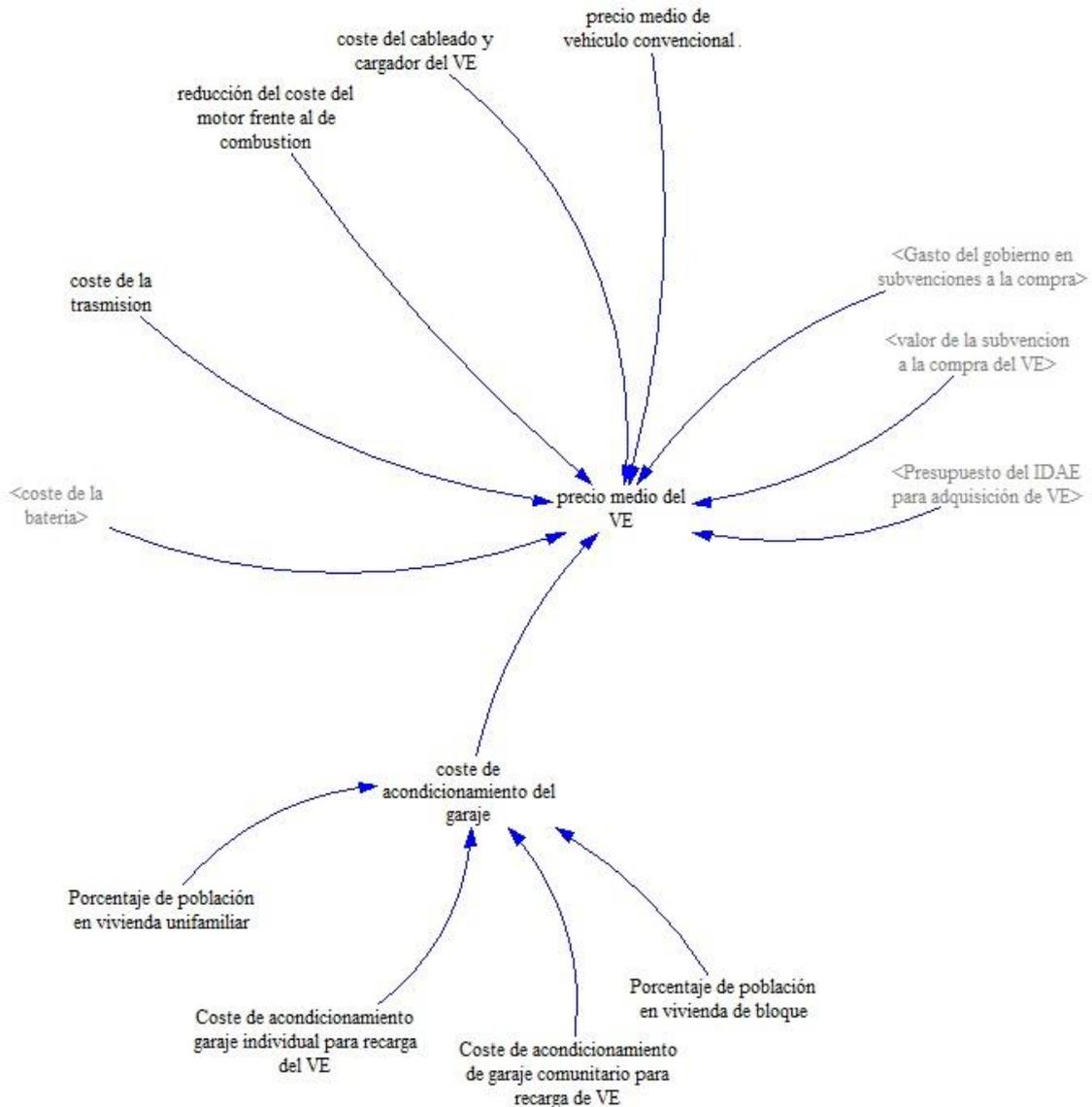
El sub-bloque más simple es el correspondiente al coste de la adquisición del vehículo convencional por parte del cliente, puesto que es una única variable con el coste medio de los vehículos de combustión interna existentes en la actualidad. El valor de referencia utilizado es el precio medio efectivo de los vehículos en España (es decir, lo que paga el cliente) que se sitúa en algo más de 20.000 € [Faconauto] en los años 2011 y 2012.

Al comparar este valor con el del vehículo base anteriormente citado, el Renault Fluence, ya que existe en su versión tanto convencional como eléctrica, se puede observar que el modelo de combustión de este vehículo va desde precios de aproximadamente 18.000 € [Renault] en sus versiones inferiores, lo cual hace pensar que el valor de 20.000 € es un valor adecuado al mercado.

Para comenzar con las hipótesis, se ha almacenado este valor en la variable “precio medio del vehículo convencional”.

### ***Sub-bloque de Coste de compra del vehículo eléctrico***

A partir de este primer sub-bloque, se ha construido el sub-bloque del precio de compra de un vehículo eléctrico. En la figura siguiente se puede observar este sub-bloque.

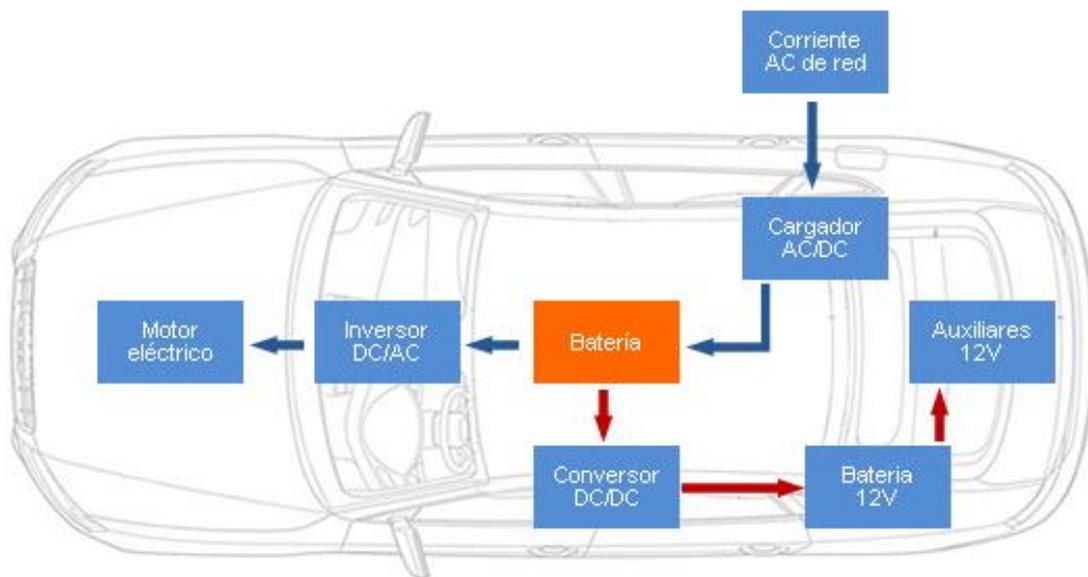


**Figura 32: Modelo del sub-bloque coste de compra del vehículo eléctrico.**

El vehículo eléctrico utiliza muchos de los mismos tipos de sistemas y componentes que un vehículo convencional, especialmente en la carrocería y el chasis. Sin embargo, el sistema de propulsión de un vehículo eléctrico es completamente diferente al de un vehículo convencional, y su almacenamiento de energía (que sustituye al tanque de combustible) se convierte en un subsistema principal. La ausencia de una forma de funcionamiento continua del motor afecta a los sistemas de accesorios tales como calefacción, ventilación y aire acondicionado, la dirección y los frenos y por lo tanto requieren independientes unidades de control sobre ellos. Además, la falta de calor residual (normalmente disponibles para un vehículo de combustión por el motor)

significa que se necesita una alternativa de fuente de energía a bordo para calentar la cabina de pasajeros.

Según esto, el coste de compra del vehículo eléctrico va a venir determinado por la base del coste del vehículo convencional, a la cual se le va a añadir ciertos costos a mayores, pero que también se le eliminarán otros. Un esquema simplificado del vehículo eléctrico se puede ver en la figura siguiente.



**Figura 33: Esquema simplificado del vehículo eléctrico.**

Los sobrecostes más significativos del vehículo eléctrico van a ser el cableado y el cargador necesarios para la carga, tanto en recarga lenta como en rápida del vehículo, así como la diferente transmisión que es necesaria [Bandivadekar08] y por supuesto la batería, mientras que la reducción de precio más importante vendrá dada por el motor.

El motor eléctrico es un sistema bastante sencillo, mucho más simple y mucho más compacto que el tren de potencia del motor equivalente de un vehículo convencional. El tren motriz del vehículo convencional no requiere sólo el motor, sino también una transmisión de velocidad múltiple, un sistema de refrigeración, un sistema de escape, un emisiones del sistema de control, y un número de subsistemas de motores, tales como el sistema eléctrico (arranque, encendido, etc), el consumo, control de ruido y vibración, y el control electrónico. El tren de potencia del vehículo eléctrico

comprende esencialmente sólo el motor eléctrico, su sistema de control electrónico, y un solo tren de engranajes. Para ello, no es necesaria una transmisión de velocidad múltiple. El motor eléctrico tiene una relación velocidad-par más favorable en comparación al motor de combustión como se explicó en el capítulo introductorio, y en consecuencia es más fácil cubrir toda la gama de velocidades del vehículo con sólo una reductora. Es habitual utilizar la transmisión original en las conversiones de los vehículos eléctricos actuales, a pesar de que muchos de los engranajes se quitan realmente. En motores avanzados diseñados específicamente para vehículos eléctricos, el tren de engranajes es una parte integral de la carcasa del motor, consiguiéndose así un ahorro significativo de costes y de peso.

La simplificación del motor anteriormente explicada conlleva una reducción del precio del mismo. Se ha estimado que un motor convencional de gasolina, tiene un coste de aproximadamente 2.400 €, mientras que el motor eléctrico únicamente cuesta 1.400 €, por lo que existe una reducción importante [Bandivadekar08]. Para corroborar este dato, se han utilizado las fórmulas de cálculo económico del “Argonne National Laboratory” [Plotkin07] que indican que el coste de un motor de combustión es:

$$\text{Coste de motor} = 600\$ + (550 * \text{n}^\circ \text{ de cilindros})\$ + (3 * \text{potencia del motor en kW})\$$$

Según esta fórmula, el coste del motor del Fluence convencional de 4 cilindros y 66 kW de potencia es de 2.437 €.

Para el caso del coste del motor eléctrico, el “Argonne National Laboratory” indica que es necesario multiplicar la potencia del motor por 25\$ [Plotkin07] para obtener el coste del mismo. Según esto, el coste del motor eléctrico de 70 kW del Fluence ZE es de 1.422 €. Si se comparan ambos valores, el resultado es muy similar al explicado anteriormente, por lo que se ha considerado la estimación como válida.

Según los datos consultados [Bandivadekar08], [Electrification09], el sobre coste debido al cargador y los cableados, van a tener un valor de aproximadamente 480 €, mientras que el coste de la transmisión será de 160 €.

Por otra parte, el motor eléctrico requiere un componente adicional: un sistema de control del motor que permita ajustar en cada punto de carga, el par requerido y la

velocidad deseada. El coste del controlador era en el año 2008 de aproximadamente 1.200 € [Bandivadekar08]. Dicho coste se ha ido reduciendo y en la actualidad es de aproximadamente 1.020 € pero se prevé una reducción significativa de su precio con la producción en masa llegando a un 70% de su valor actual [Blesl09], [Ipts05]. Este valor se ha modelado en el sistema como una curva con coste inicial de 1.020 € que irá descendiendo con el tiempo para adecuarse a dichos valores.

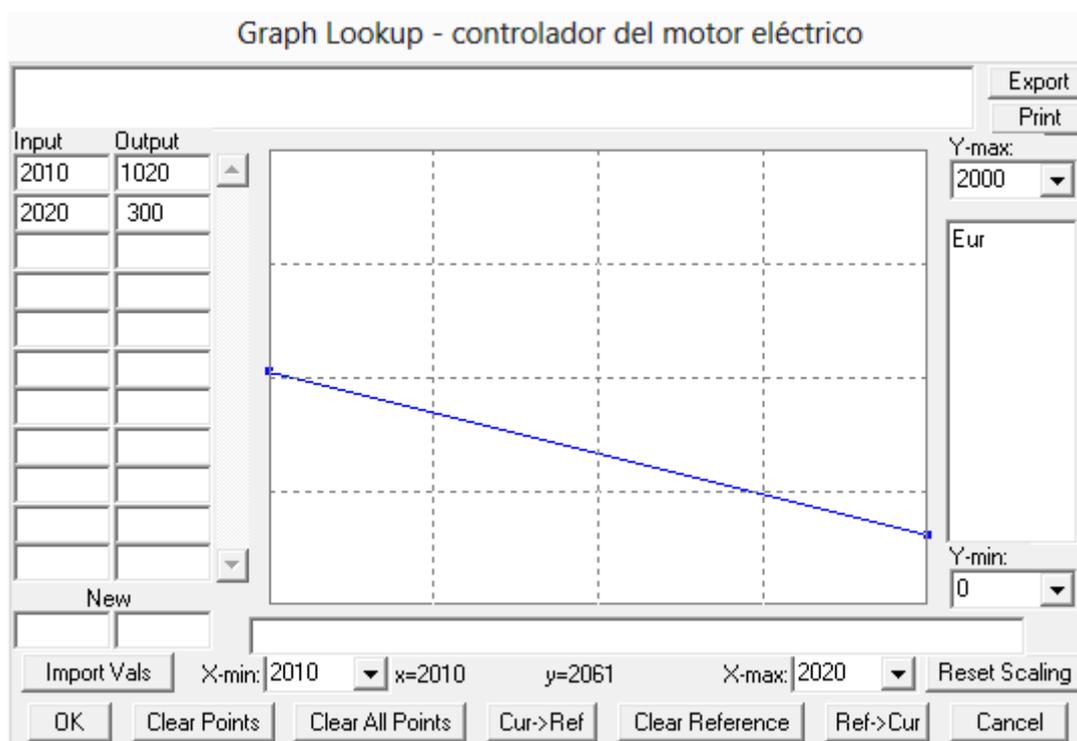


Figura 34: Coste del controlador eléctrico en función del tiempo.

En los vehículos eléctricos o vehículos híbridos con batería de almacenamiento, también se requiere un componente adicional denominado convertidor DC/DC. Éste se utiliza para convertir la tensión de 100V a 12V necesaria para los sistemas auxiliares del vehículo. El coste dependerá en gran medida de la tensión de entrada, pero su coste estará en torno a los 300 € [Blesl09], [Graham01]. Además de este convertidor, también será necesario un convertidor AC/DC utilizado para poder recargar la batería mediante la conexión de la misma a una alimentación de corriente alterna externa. El coste de este convertidor es de aproximadamente 400€ [Blesl09], [Graham01]. También serán necesarios los cables bus de alta tensión para conectar la alimentación del convertidor con el motor [Guttowski03]. Su coste será de aproximadamente 813 € [Electrification09].

A todos estos costes, será necesario añadirles unos costes asociados a las baterías, pero que deben estar incluidos en el vehículo tales como la bandeja de sujeción de las baterías, un paquete hardware que incluye el sistema de control de las baterías y el sistema de gestión térmico de las baterías [Graham01]. Los costes serán almacenados en la variable “sistemas asociados a la batería” y se desglosan de la siguiente manera:

- Bandeja de sujeción: 130\$ + 5\$ por cada kWh de batería.
- Sistema de control: 460\$ + 5\$ por cada kWh de batería.
- Gestión térmica: 90\$ + 3\$ por cada kWh de batería.

Por último, el factor más relevante económicamente hablando del vehículo eléctrico frente al convencional va a ser el coste de las baterías como ya se ha explicado anteriormente, para el cual se han utilizado principalmente los trabajos Kromer and Heywood [Kromer07], Kalhammer [Kalhammer07], Duvall [Duvall04] y Kurani [Kurani08]. En el bloque de la evolución de la tecnología, se ha obtenido este coste que evoluciona con el tiempo, que será añadido al coste del vehículo convencional medio.

Un coste que también se ha considerado para este estudio es el coste del acondicionamiento del garaje para poder realizar la carga de la batería en él. Según un estudio de RACE [Race], el 80% de la población elegiría el horario nocturno para realizar la carga del vehículo eléctrico, por lo que se asume para una simplificación del modelo que en estos primeros años de comercialización del vehículo eléctrico, todo cliente que adquiriera un vehículo eléctrico, también va a acondicionar su garaje colocando un sistema de carga en el mismo.

En este punto va a ser muy importante conocer si el garaje del que se dispone es individual o es comunitario, puesto que, pese a que el sistema de carga es similar, el método de cálculo de la electricidad consumida es muy diferente. Esto es debido a que en un garaje individual toda la electricidad consumida (bien sea por la carga de un vehículo eléctrico o por tener conectado un equipo climatizador por ejemplo) va a ser facturada a un único consumidor. En cambio, en el garaje comunitario es necesario discriminar el origen del consumo para poder ser facturado.

Según los datos obtenidos en el Instituto Nacional de Estadística (INE), un 28% de la población vive en una vivienda unifamiliar, mientras que el 72% restante

vive en un bloque. Si bien es cierto que no el 100% de la población dispone de garaje, en este estudio se ha obviado ese dato, puesto que según todas las encuestas [Race], el cliente potencial dispone de garaje, máxime si se considera la fase temprana de implantación del vehículo eléctrico en la que el estudio se encuentra enmarcado.

En un garaje de una vivienda unifamiliar simplemente es necesario disponer de una toma doméstica de 230V y 16A. Debido a esto el coste que se ha estimado es de aproximadamente 100€, puesto que habrá que llevar dicha toma a los garajes que no dispongan de ella y habrá que realizar un mínimo acondicionamiento.

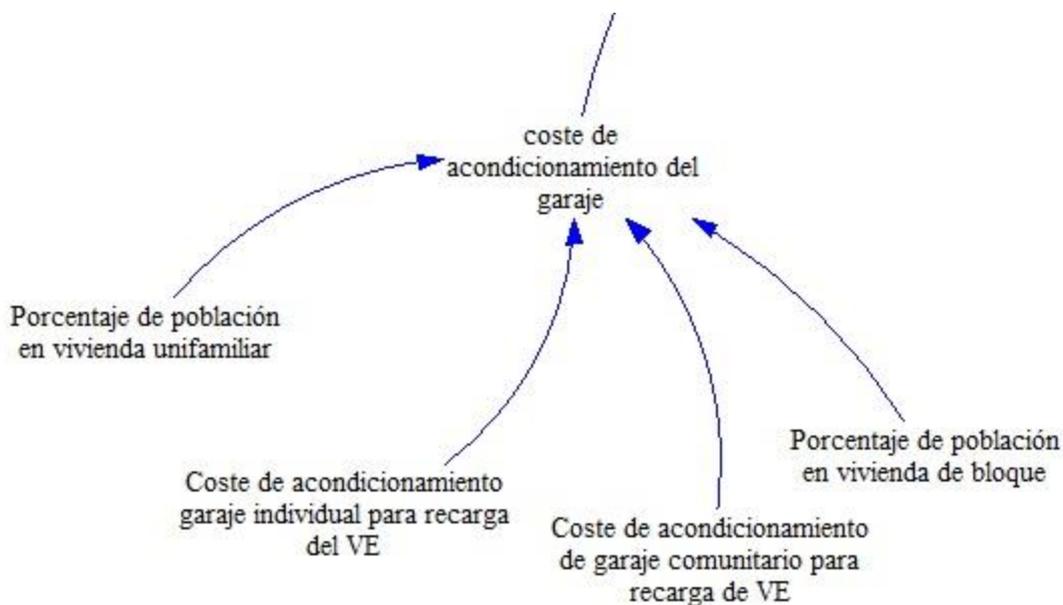
En el caso de los garajes comunitarios el sistema es ligeramente más complejo. Si bien la legislación ya autoriza y facilita este tipo de instalaciones para garajes comunitarios (Ley 49/1960, de 21 de julio, sobre Propiedad Horizontal), en este caso además de disponer de una toma de dimensiones similares a las del garaje individual, es necesario disponer de un contador para discriminar el origen del consumo [Gómez12]. De esta manera, la comunidad de vecinos paga el total de la electricidad consumida, y luego ese coste es distribuido entre los usuarios de los vehículos eléctricos existentes de manera proporcional a su consumo. No obstante, y en previsión de la generalización de la recarga del vehículo eléctrico en garajes comunitarios, varias marcas de circuitos eléctricos están comenzando a comercializar soluciones para garajes comunitarios tales como sistemas de monitorización de los cargadores con interfaz, o en sus versiones más simples, puntos de recargas individuales que se activan mediante un lector de usuario, lo cual va a eliminar posibles actos vandálicos.

A la vista de los sistemas eléctricos a instalar en el garaje comunitario, es lógico pensar que el coste de la instalación será muy superior a la del garaje individual. Contando con presupuestos reales, y teniendo en cuenta que es necesario la realización de una certificación al ser una instalación nueva, se ha estimado un coste medio de 900€ en el acondicionamiento del garaje comunitario para la carga del vehículo eléctrico.

Según todos los datos explicados, el resultado del coste de acondicionamiento del garaje en general va a ser el resultado de multiplicar el coste de acondicionamiento de cada tipo de garaje por su porcentaje de población asociado.

*coste de acondicionamiento del garaje=*

*Porcentaje de población en vivienda unifamiliar\*Coste de acondicionamiento garaje individual para recarga del VE + Porcentaje de población en vivienda de bloque\*Coste de acondicionamiento de garaje comunitario para recarga de VE*

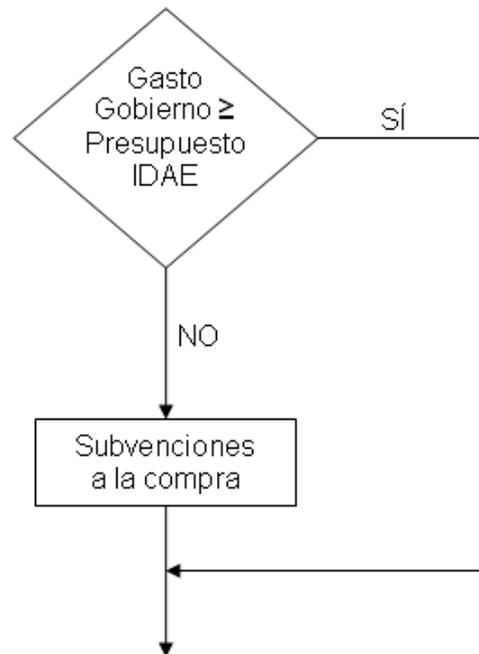


**Figura 35: Modelado del coste del acondicionamiento del garaje para la recarga en función del tipo de garaje.**

Como último factor que se ha considerado dentro del precio de compra del vehículo eléctrico, son los incentivos en forma de subvenciones que el Gobierno pueda dar el momento determinado de la compra. Para éste cálculo, se han utilizado tres variables relacionadas entre sí: el valor de la propia subvención, el presupuesto que el IDAE tiene para gastar en subvenciones a la compra, y por último, la cantidad del presupuesto que ya se lleva gastado en subvenciones. Todas ellas se verán posteriormente en el bloque del Gobierno.

El valor de la subvención existente en cada momento sólo será descontado del precio de compra, en el caso de que aun quede dinero presupuestado a tal efecto. Según esto, en el modelo se ha realizado una comparación entre el dinero gastado por el Gobierno en subvenciones y el presupuesto existente. En el caso de que el dinero gastado sea inferior al presupuesto, la subvención a la compra se efectuará. En el caso de que el dinero gastado sea superior o igual al presupuesto, no se concederá

subvención alguna. Este funcionamiento se puede observar en el siguiente diagrama de flujo.



**Figura 36: Diagrama de flujo para la existencia de subvenciones a la compra.**

Con todos los valores anteriormente calculados, se ha obtenido el precio medio de la compra de un vehículo eléctrico.

*precio medio del VE=*

*precio medio de vehículo convencional-reducción del coste del motor frente al de combustion+coste del cableado y cargador del VE+coste de la trasmision+coste de la batería+coste de acondicionamiento del garaje-IF THEN ELSE(Gasto del Gobierno en subvenciones a la compra<Presupuesto del IDAE para adquisición de VE, valor de la subvención a la compra del VE(Time),0)*

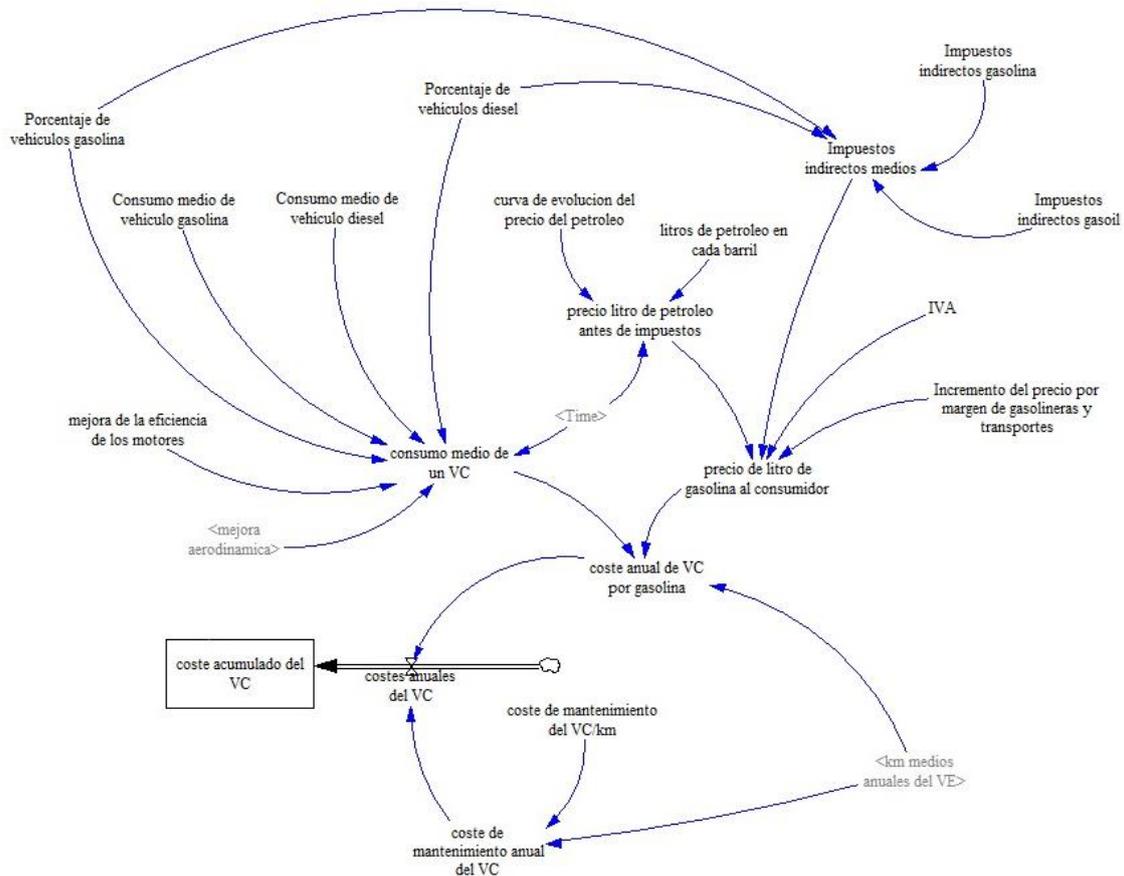
En la ecuación se puede ver cómo, al precio de partida inicial que es el precio del vehículo convencional, se le han ido añadiendo los sobrecostos anteriormente comentados, así como se le ha reducido el menor costo del motor. En la parte final de la

ecuación, se puede observar el concepto de subvención mediante una comparación entre el gasto del Gobierno y el presupuesto del IDAE.

**Sub-bloque de Coste anual del vehículo convencional**

El siguiente sub-bloque a estudiar es el correspondiente al coste del vehículo convencional a lo largo de su vida útil, debido a su utilización.

En este sub-bloque van a existir dos conceptos principales que son el coste anual que el vehículo va a tener debido al consumo de combustible y el coste de mantenimiento que el vehículo va a tener. En la figura 37 se muestra dicho sub-bloque.



**Figura 37: Modelo del sub-bloque del coste anual del vehículo convencional.**

Comenzando el análisis con el consumo anual de combustible, lo primero que se ha realizado es determinar el consumo medio que tiene un vehículo de combustión interna en la actualidad. Para ello se han utilizado valores estadísticos. Se ha considerado que el consumo medio de un vehículo de gasolina es de 8 litros por cada 100 kilómetros, mientras que el consumo medio de un vehículo diesel es de 6 litros por

cada 100 kilómetros [Cee09]. Teniendo en cuenta que en España, el 51,8% de los vehículos son diesel y el 48,2% son gasolina [Anfac12], el consumo medio actual de un vehículo de combustión interna será el producto del consumo de los vehículos a gasolina por su porcentaje sumado al producto del consumo de los vehículos diesel multiplicado por su porcentaje. Se ha mantenido este valor como constante ya que no se conoce exactamente qué va a pasar en el futuro a pesar de que la tendencia del mercado español es a la compra de vehículos diesel como se puede observar en la figura siguiente, y la repercusión sobre el resultado final del modelo será mínima.

### Matriculación de turismos por carburante

*New car registration by type of fuel*

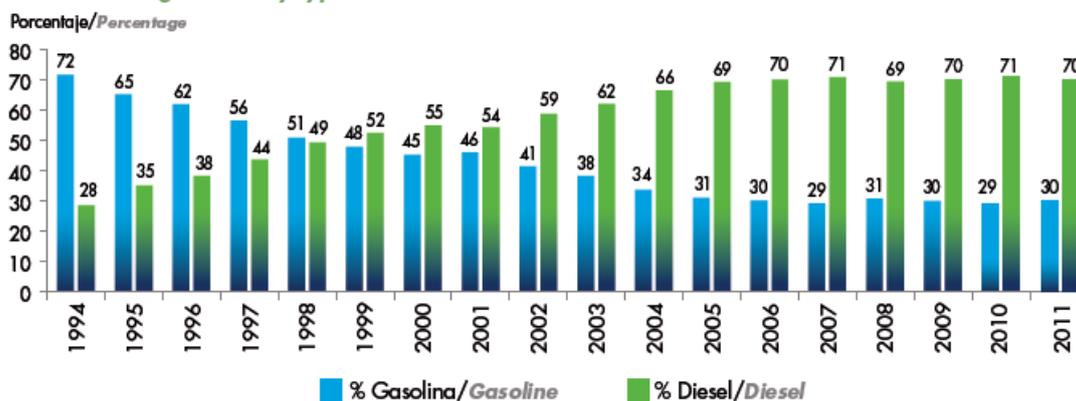


Figura 38: Matriculación de vehículos por tipo de carburante en España [Anfac12].

Todos estos cálculos, se han realizado en base a los datos actuales, pero al igual que pasaba con las mejoras previstas en las baterías de los vehículos eléctricos, también existen ciertas mejoras en la eficiencia de los motores que se van a desarrollar en los próximos años.

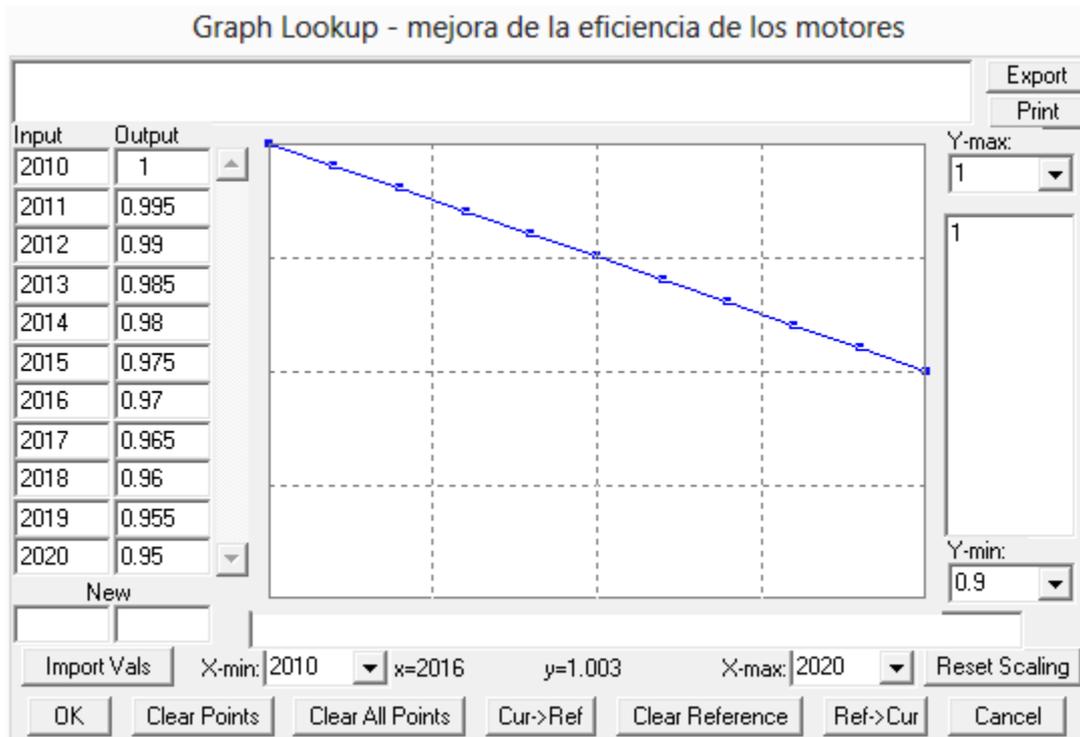
La primera mejora que se ha tenido en cuenta es la mejora aerodinámica. Ésta es independiente del tipo de combustible a utilizar tal y como se ha visto anteriormente en la mejora del consumo del vehículo eléctrico. Según esto, se ha considerado la misma reducción del coeficiente aerodinámico que implica una reducción del consumo del vehículo de un 1%, al igual que sucedía en el consumo del vehículo eléctrico [Bandivadekar08].

La segunda mejora corresponde única y exclusivamente a los motores de combustión interna. Los avances en esta tecnología han sido proyectados en base a una

extrapolación histórica según las tendencias, que indican mejoras de eficiencia previstas del orden del 0,5% por año [Bandivadekar08]. Estas mejoras pueden venir de varias vías de investigación abiertas en la actualidad, tales como [Blesl09]:

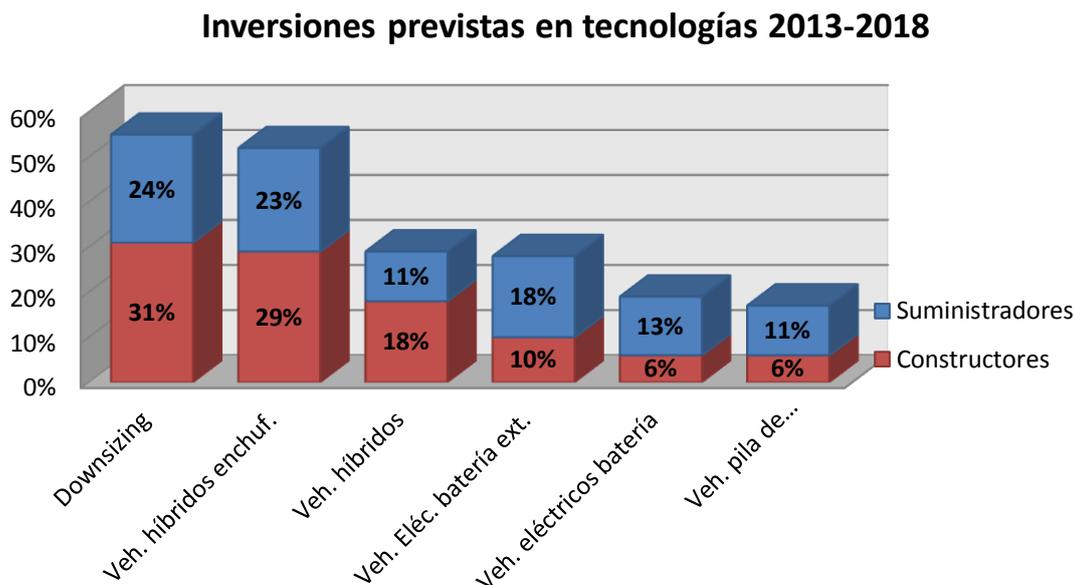
- Oportunidades en la reducción de la fricción, que incluyen la mejora de los materiales de fabricación, mejoras en el diseño del anillo del pistón, lubricantes sintéticos, etc.
- Sistemas inteligentes de refrigeración que pueden reducir las pérdidas de calor del motor.
- Sistema de desactivación de cilindros, el cual desactiva algunos de los cilindros del motor en cargas bajas.
- Recirculación de los gases del escape.
- Motores con relación de compresión variable, que puede operar a relaciones de compresión mayores en cargas bajas.
- *Downsizing*: Sustituir los motores de gasolina de cilindrada importante por otros más pequeños sobrealimentados, para introducir más aire en los cilindros de la que el motor es capaz de aspirar para reducir el consumo, manteniendo el mismo nivel de potencia y par que con el motor de referencia.
- La reducción del peso sobre la que se estima que por cada 100 kg de reducción de peso, se obtiene una reducción de 0,69 l/km [Bandivadekar08].

Según esto, se ha considerado un descenso del consumo medio del vehículo de combustión interna de un 0,5% anual. Esto se ha modelado en la variable “mejora de la eficiencia de los motores”.



**Figura 39: Modelo de la mejora de la eficiencia de los motores de combustión interna.**

Esto además se corrobora con los últimos estudios que indican que a pesar de los nuevos desarrollos tecnológicos, se espera que la sustitución de los motores de combustión por otros más pequeños sobrealimentados (*downsizing*) sea la solución líder para el futuro próximo de cara a la eficiencia energética [Kpgm13]. De hecho, se espera que en los próximos años esta técnica sea la que reciba las mayores inversiones como se muestra en la siguiente figura.



**Figura 40: Inversiones previstas en las diversas tecnologías en los próximos años [Kpgm13].**

Una vez se ha obtenido el consumo medio de los vehículos convencionales en la actualidad, y modeladas las mejoras, tanto aerodinámicas como de eficiencia de los motores, se puede obtener que el consumo medio de un vehículo convencional a lo largo de la simulación vaya a venir determinado por la variable “consumo medio de un VC” que relacionará todos estos valores.

*consumo medio de un VC=*

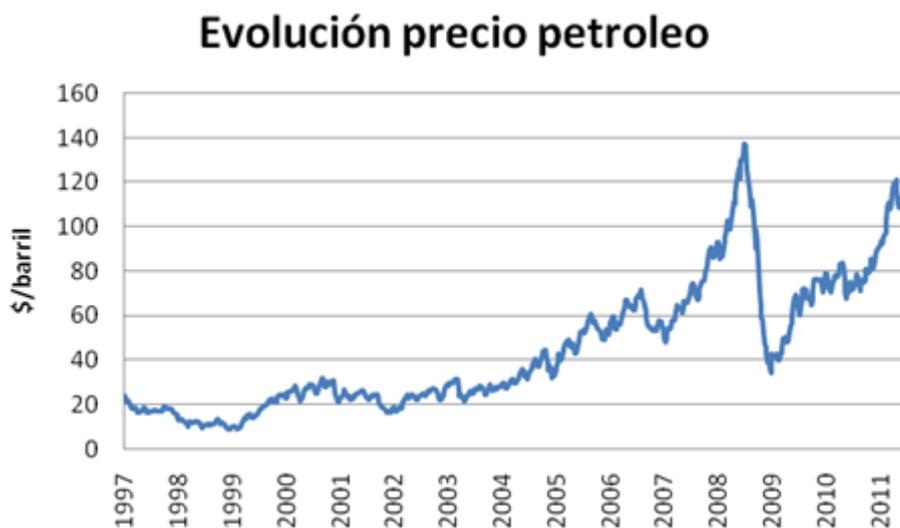
$$((\text{Consumo medio de vehículo diesel} * \text{Porcentaje de vehículos diesel}) + (\text{Consumo medio de vehículo gasolina} * \text{Porcentaje de vehículos gasolina}) * \text{mejora de la eficiencia de los motores}(\text{Time}) * \text{mejora aerodinámica}(\text{Time}))$$

Una vez se ha calculado el consumo medio, será necesario determinar el coste que tiene un litro de combustible. Para ello, hay que comenzar por obtener el precio del petróleo.

Estimar cómo va a ser la evolución del precio del petróleo en los próximos 10 años es una tarea de gran complejidad y de una gran índice de fallo. El precio del petróleo depende de numerosos factores. Existen pocas reservas en el mundo y es un bien escaso. Como dato, según la OPEP (Organización de Países Exportadores de Petróleo, o en inglés OPEC, *Organization of the Petroleum Exporting Countries*) en

2011 las reservas probadas (cantidades de petróleo que por estudios de geología e ingeniería pueden ser estimadas con gran certeza recuperables comercialmente en el futuro) son de 1.482 billones de barriles de petróleo crudo sin contabilizar los volúmenes de LGN, condensados y aceites extraídos de minerales bituminosos [Opec11], siendo poseedor la OPEP del 81% de las reservas mundiales en el año 2011.

Además, existe un desajuste entre la oferta y la demanda, es decir, cuando hay más interés en comprar petróleo y la producción se mantiene constante, el precio sube. Otro factor importante a tener en cuenta, son las grandes especulaciones financieras, a parte de las condiciones geopolíticas existentes (el precio del petróleo puede subir por situaciones de carácter político que involucren a países productores). En la figura siguiente se puede observar la evolución del precio del petróleo en las últimas décadas.



**Figura 41: Evolución histórica del precio del petróleo [Useia10].**

En ella se puede observar la gran variabilidad del precio, máxime si se tiene en cuenta que entre 2003 y 2009, el mercado mundial de petróleo fue testigo de su periodo más significativo de volatilidad en casi una generación. Después de aumentar incesantemente durante cinco años, los precios del petróleo se dispararon a máximos históricos de más de 147 dólares por barril en julio de 2008 [Electrification10b]. No por casualidad, la crisis hipotecaria y financiera mundial estalló tan sólo unos meses más tarde, sumiendo la economía mundial en la recesión más grave desde la Segunda Guerra Mundial.

Sin ser capaces de conocer todas estas futuras incertidumbres, se deriva la complejidad de modelar matemáticamente esta evolución.

La alta volatilidad de los precios del petróleo han sido los más persistentes riesgos estructurales para la economía de EE.UU. durante décadas y por efecto dominó del resto del planeta. El ciclo de auge y caída de los precios del petróleo, que ha estado en vigor desde 2003 (y otras tantas veces desde 1970) contribuye a un alto grado de incertidumbre en todo lo referente a la economía, lo que resulta en la menor actividad económica, aumento del desempleo y la expansión de la deuda pública. Cuando la dinámica del mercado mundial del petróleo ha generado perturbaciones importantes en los precios, el resultado ha sido a menudo una recesión seguida por un gran gasto público.

No obstante, y para obtener un modelo más realista no se ha mantenido el precio del petróleo fijo (con el valor del inicio de 2010) a lo largo de la simulación, sino que evolucione con el tiempo a lo largo de la misma. Para ello se han consultado numerosos estudios e informes de las diversas agencias de energía siendo enormemente complejo el obtener unos datos ciertamente fiables. A modo de ejemplo se muestra a continuación una estimación de la demanda mundial para los próximos años realizada en base a datos de la Agencia Internacional de la Energía [Van Mierlo06].

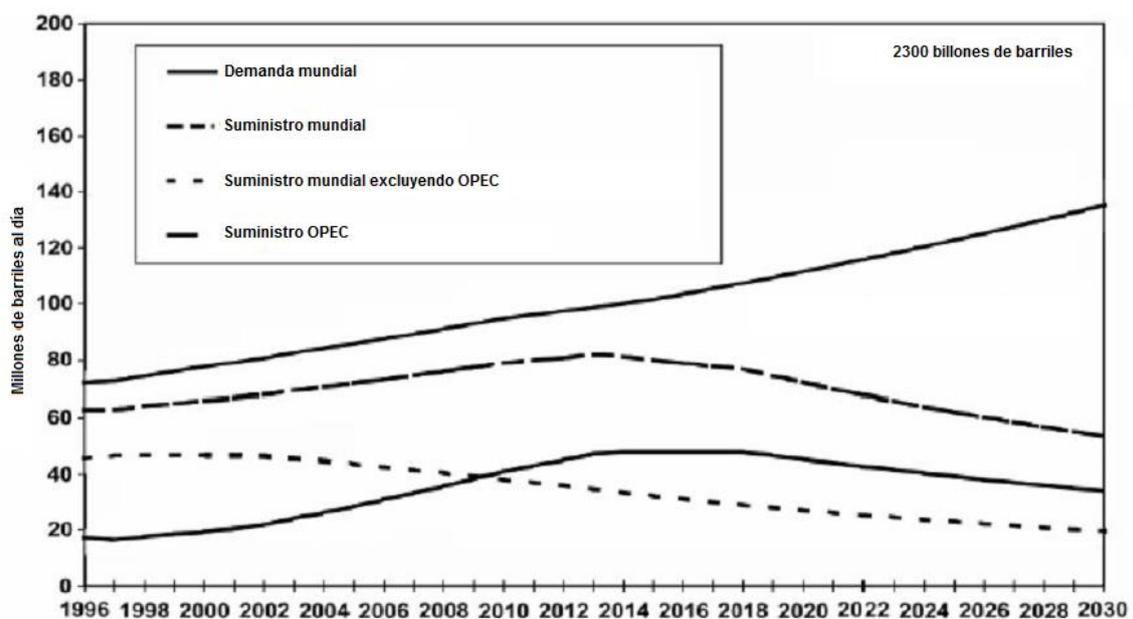
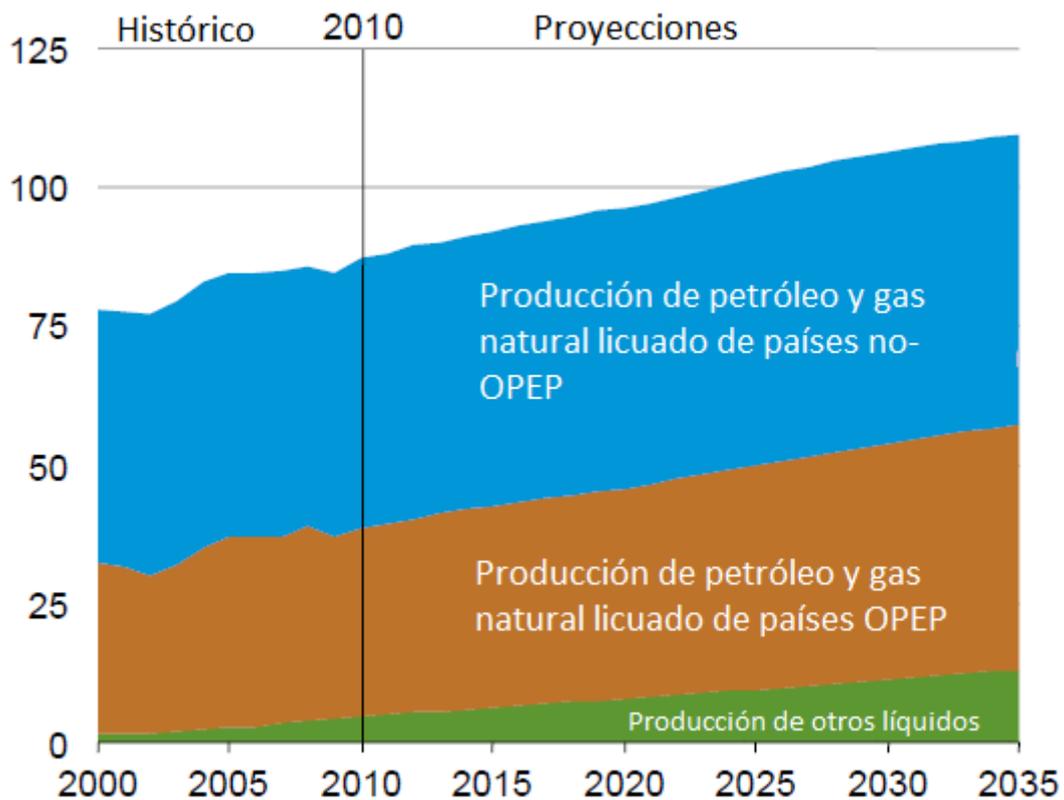


Figura 42: Estimación de demanda de petróleo en los próximos años [Van Mierlo06].

De todos los estudios se ha tomado como el más realista el “Annual Energy Outlook 2012” realizado por la U.S. Energy Information Administration [Useia12]. Dentro de este estudio, se tratan 3 escenarios principales para la variación del precio del petróleo, siendo el utilizado para este estudio el caso de referencia. Estos valores se basan en la suposición de que las prácticas actuales, políticas y niveles de acceso al mercado del petróleo continuarán en el corto y medio plazo. En este escenario se asume que continuará el crecimiento económico robusto en las naciones no incluidas en la *Organization for Economic Cooperative Development* (OECD), incluyendo China e India, que compensará un menor crecimiento de muchas de las naciones de la OECD. En el escenario de referencia, el consumo de petróleo procedente de los países no OECD será de aproximadamente 21 millones de barriles más elevado por día en el año 2035 que en el año 2010, mientras que el consumo de la OECD sólo aumentará en aproximadamente 2 millones de barriles al día. Entre 2008 y 2030, se espera un aumento del consumo del petróleo en los sectores de transporte de China, India y la región del Medio Oriente que previsiblemente representarán el 70% del total del aumento del consumo diario mundial de petróleo. Las crecientes clases medias y los superiores niveles de vida en estas regiones ejercerán una presión constante sobre los proveedores mundiales de petróleo para ampliar la capacidad. En la siguiente figura se puede observar la previsión de la producción de petróleo y otros líquidos a nivel mundial realizada en el escenario de referencia [Useia12].



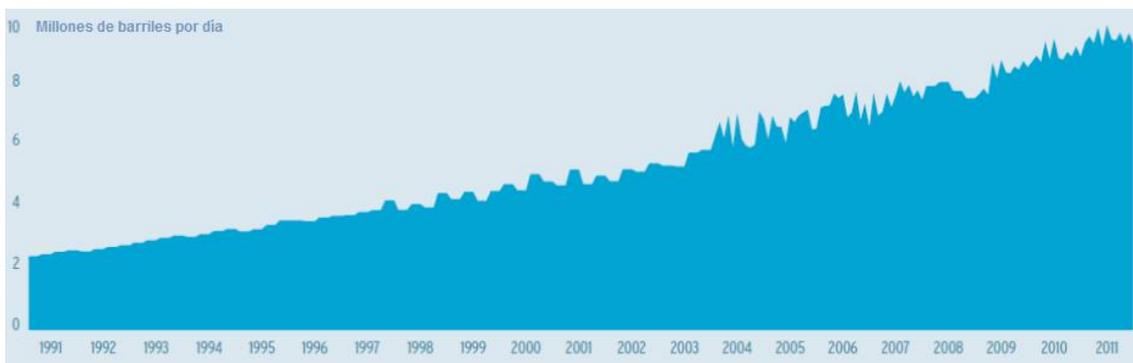
**Figura 43: Previsión de la producción de petróleo y otros líquidos en el escenario de referencia (en millones de barriles al día) [Useia12].**

A esto hay que añadir la previsión de vehículos en funcionamiento en el futuro próximo en China, que indica que en el año 2030 existirán tantos vehículos como en los EE.UU. en el año 2008, es decir 250 millones [Kendall08], teniendo en cuenta que en el año 2006 solamente existían 22 millones, siendo el sector de la automoción uno de los pilares que soporta el desarrollo económico de la nación.



**Figura 44: Cambio en demanda de petróleo por región y sector (2007-2030) [Electrification10b].**

No obstante, los factores que llevaron a altos precios del petróleo y la volatilidad creciente en el mercado mundial de petróleo en los últimos años, no tienen alta probabilidad que vuelvan a alterar de manera significativa en el medio y largo plazo. Sin inmutarse por la recesión económica mundial, China registró un aumento del 6% en la demanda de petróleo en 2009.



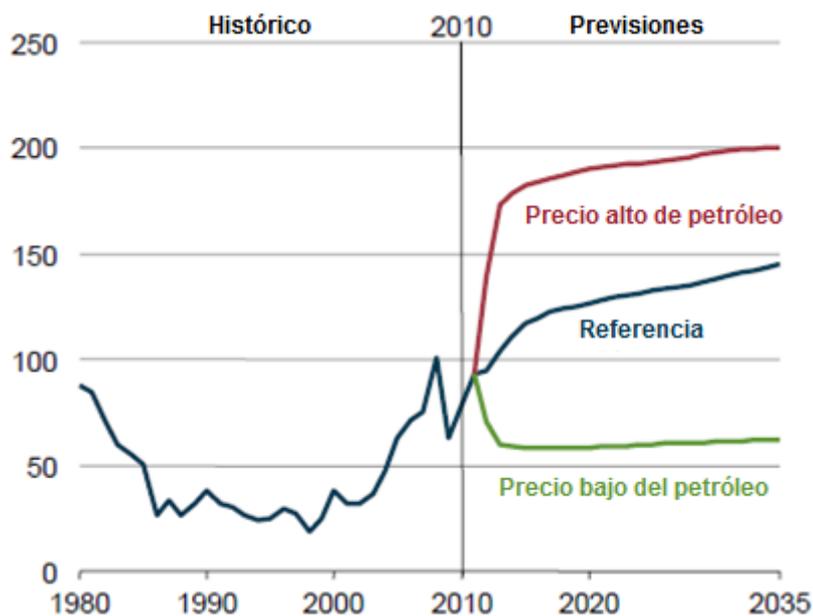
**Figura 45: Demanda de petróleo en China (1991-2011) [Electrification10b].**

En términos más generales, el crecimiento de la energía que demandan los mercados emergentes ahora establece el paso del mundo. El crecimiento de la demanda de petróleo en las economías emergentes ha alcanzado un promedio del 3,6% al año desde 2000, resultando en un aumento neto de la demanda de 9,6 millones de barriles por día entre 2000 y 2009 [Bp10]. La mayor parte de este incremento ha sido dedicada para el transporte. El crecimiento de la demanda de los mercados emergentes está poniendo nuevas presiones sobre los suministros de petróleo. Tal y como se ha mencionado anteriormente, en gran parte, el alto nivel de volatilidad del precio del petróleo a partir de 2003 resultó de la incapacidad de los productores para responder adecuadamente al fuerte aumento de la demanda impulsada por las economías de mercado emergentes. El rápidamente creciente consumo de petróleo en China, India, y Oriente Medio hizo hincapié en la producción mundial de petróleo llevando el sistema a sus límites. El resultado fue una rápida erosión de la capacidad excedentaria en la OPEP. En dicho entorno, incluso pequeñas perturbaciones o cambios en evaluaciones del mercado sobre el equilibrio entre la oferta y la demanda puede causar fuertes oscilaciones de precios en el petróleo crudo y combustibles al por menor.

En este escenario, también se asume que las limitaciones de acceso a los recursos en muchas áreas frenan el crecimiento de la producción de petróleo de los países no pertenecientes a la OPEP, mientras que la producción de petróleo de los países

de la OPEP mantiene una proporción relativamente constante del total mundial de petróleo, suministrando entre un 40% y un 42%.

Con estos factores limitantes, satisfacer la cada vez más alta demanda de petróleo en las próximas décadas requiere producción de petróleo proveniente de unos recursos de mayor costo, particularmente para los países productores fuera de la OPEP con dificultades técnicas en los proyectos de abastecimiento. En el caso de referencia, el aumento del costo del suministro de los países no-OPEP, la participación constante en el mercado de la OPEP, y la rebaja de las restricciones del WTI (West Texas Intermediate) se combinan para apoyar a los aumentos medios en tiempo real de los precios del petróleo de alrededor del 5% por año entre 2010 y 2020 y de aproximadamente el 1% por año desde 2020 hasta 2035.



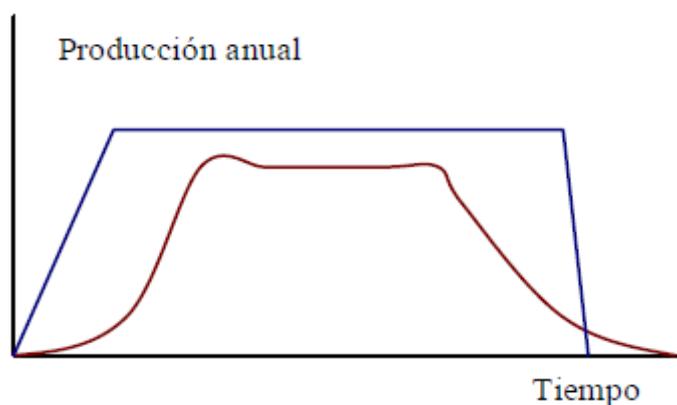
**Figura 46: Escenarios de precio del petróleo según la U. S. Energy Information Administration [Useia12].**

A todos estos factores, se ha considerado necesario incluir un breve inciso sobre la capacidad técnica para ampliar esta capacidad que se puede llegar a demandar. Para ello es necesario dedicar una pequeña reseña a la Teoría de Hubbert. King Hubbert fue un geofísico estadounidense que en 1956 publicó un artículo [Hubbert56] sobre el futuro de la extracción de los combustibles fósiles que marcó un hito sobre el impacto de dicha extracción en la sociedad. En el artículo indicaba que es clave realizar la mejor

estimación posible de las reservas recuperables últimas para predecir la extracción futura de los combustibles. A partir de las mejores estimaciones de la época, Hubbert modeló cual sería el futuro de la extracción de carbón, petróleo y gas natural para Estados Unidos y el resto del mundo.

Su teoría se basa en que la pendiente del logaritmo de la extracción anual histórica de los combustibles fósiles tiende a ir descendiendo hacia una curva que ajusta a una parábola con forma de “U” invertida, de tal manera que en algún momento del futuro, la tasa de variación de la extracción se hará negativa, es decir, será un decrecimiento, y por tanto indicará un descenso en la extracción tras un máximo denominado pico.

Hubbert se dio cuenta de que el perfil de extracción de cualquier pozo tiende a repetir siempre el mismo patrón: primero hay una fase de crecimiento de la extracción, para llegar posteriormente a una extracción aproximadamente constante y, si no se cambia la técnica de explotación, posteriormente la extracción va disminuyendo progresivamente. Según esta curva, en el tramo descendiente los costes de extracción se van haciendo mayores a medida que se continúa con la explotación, de manera que se van necesitando cada vez más gastos y energía para extraer el petróleo que se va agotando, hasta que se llega al punto en que es necesaria tanta energía para la extracción, como la que se obtiene del petróleo resultante, momento a partir del cual deja de tener sentido continuar la explotación de un pozo, sea cual sea el precio que tenga este en el mercado. Esto se puede ver representado en la siguiente figura.



**Figura 47: Extracción realista de un pozo de petróleo (curva granate) y de un pozo idealizado (curva azul) [Castro09a].**

Hubbert también detectó que la extracción de un conjunto elevado de pozos termina siendo la suma de ellos con curvas como la granate de la figura anterior, de tal forma que el resultado final es un perfil de forma aproximada a campana de Gauss. Esta observación extrapolada para el resto de combustibles es la hipótesis esencial de su teoría.

Dentro de su teoría, existe una segunda hipótesis principal: la probabilidad de descubrir petróleo es directamente proporcional a la fracción de petróleo no descubierto. Teniendo en cuenta que el petróleo es un recurso finito y no renovable, lógicamente la cantidad de descubrimientos que se realicen tiene que llegar a un momento en que empiece a disminuir, hasta que se haga despreciable.

Cuando Hubbert presentó sus teorías, manejaba datos de principios de la década de 1950. Sin embargo muchas de sus previsiones fueron correctas. La más conocida fue que la extracción de petróleo crudo en Estados Unidos llegaría a su máximo a finales de la década de los 60 o comienzos de la década de los 70. A mediados de los años 70 las instituciones norteamericanas reconocieron que la extracción de petróleo tuvo su máximo en 1970-71 lo que hizo saltar a la fama a Hubbert y sus teorías.

El modelo que creó para la extracción mundial de petróleo arrojaba su pico de extracción alrededor del año 2000. Este dato no se cumplió por las restricciones a la demanda y por qué sus estimaciones de las reservas recuperables últimas eran entonces de 1250Gbarriles (frente a los 2000Gbarriles que se han calculado posteriormente) [Castro09a]. Posteriormente en 1976, en una entrevista para la televisión, sus gráficas en cambio presentaban ya unas reservas recuperables últimas para el petróleo crudo de 2000Gbarriles y un pico en el año 1995. Teniendo en cuenta las posibles consecuencias de la crisis provocada por la OPEP en el año 1973 indicó que las restricciones a la demanda trasladarían el pico de la extracción aproximadamente a una década después, es decir, aproximadamente al año 2005.

La Agencia Internacional de la Energía situó en el año 2006 el pico máximo e indica que el declive global comenzará en torno al año 2020 [Iea11], [Iea13]. También indican dentro de sus suposiciones que antes de que llegue esta crisis habrá importantes

inversiones en combustibles alternativos que obviamente harán fluctuar los precios del petróleo, como por ejemplo el petróleo no convencional [Castro09b].

Una vez que se ha explicado la incertidumbre a nivel mundial de las reservas de petróleo existentes, máxime cuando se ha alcanzado el “pico”, se hace aún más patente la dificultad de una predicción correcta de la evolución del precio del petróleo, pero para la obtención de un modelo más realista se ha considerado imprescindible.

Los valores previsionales del precio del barril en dólares utilizado en el estudio son con un aumento estimado del 5% hasta el año 2020:

AÑO	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
PRECIO	79,39	83,36	87,53	91,90	96,5	101,32	106,39	111,71	117,23	123,16	129,32

En la siguiente tabla se puede observar la previsión que la misma agencia publicó en su informe dos años antes [Useia10].

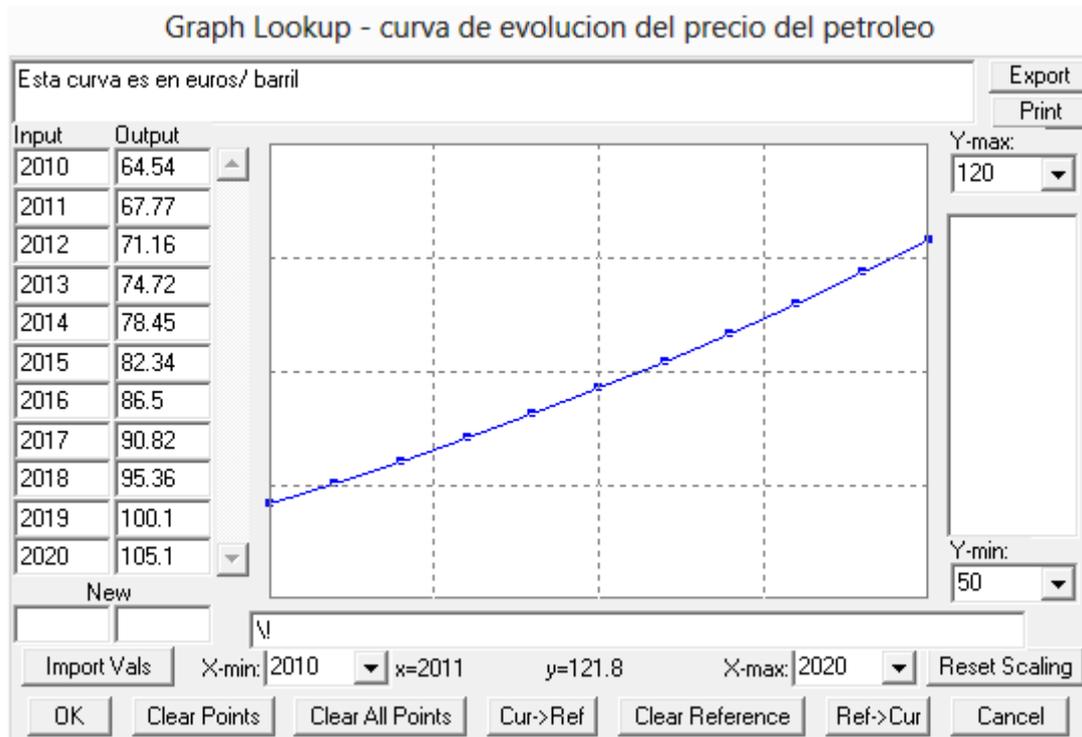
AÑO	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
PRECIO	70,30	73,06	79,41	85,74	90,91	94,52	98,23	101,23	104,41	106,47	108,28

Se puede ver claramente que la variación de precios es muy significativa, lo que vuelve a demostrar la dificultad de obtener una estimación realista del futuro precio del petróleo.

Puesto que todo el modelo está calculado en euros, es necesario convertir el precio del barril que está en dólares, a esta unidad monetaria. Para toda la simulación, todos los valores en dólares han sido convertidos a euros con una tasa de 1,23, es decir

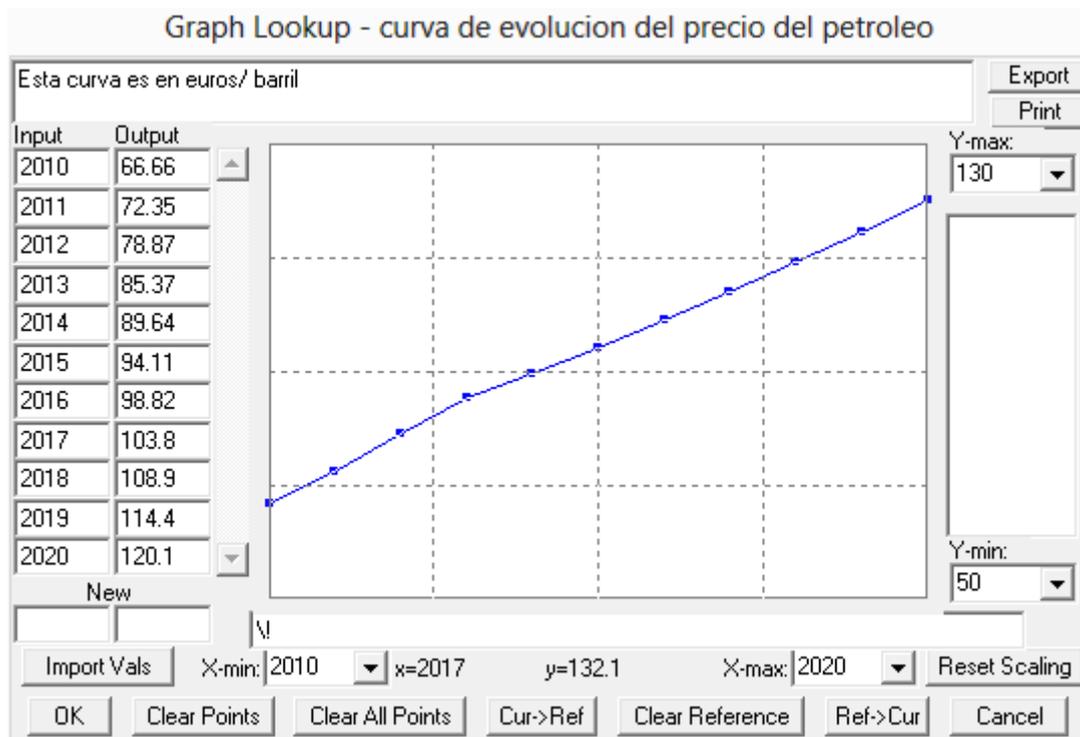
$$1 \text{ €} = 1,23 \text{ \$}$$

Esta previsión del precio del barril en euros se ha modelado a través de la variable “curva de evolución del precio del petróleo”, obteniendo una curva de la siguiente forma.



**Figura 48: Modelo de la curva de evolución del precio petróleo hasta el 2020 en primera simulación.**

Se puede observar claramente en la gráfica que la curva es continua y no tiene gran similitud con la curva histórica anteriormente mostrada, pero en este caso se pretende analizar tendencias, y no los saltos bruscos por motivos políticos y/o económicos que puedan surgir. Sin embargo, al analizar los datos del año 2013 se ha ajustado la curva a los valores reales que se conocen y en base a las estimaciones existentes se ha considerado de media un aumento anual del 5% del precio del petróleo que es lo que indicaba el informe del U.S. Energy Information Administration [Useia12].



**Figura 49: Modelo de la curva de evolución del precio petróleo utilizada hasta el 2020.**

Puesto que el dato del precio del petróleo está indicado por barril, y el consumo del vehículo está en kilómetros por litro, es necesario obtener el precio del litro de petróleo. Para ello, simplemente se ha dividido el valor de la curva del precio del petróleo en cada momento del tiempo entre 159 que es el número de litros de petróleo que contiene cada barril. Con esto se ha obtenido la variable

*precio litro de petróleo antes de impuestos=*

*curva de evolución del precio del petróleo(Time ) /litros de petróleo en cada barril*

Como su nombre indica, el valor del petróleo actual es antes de impuestos. A este valor será necesario añadirle todos los impuestos a los que se ve afectado, así como los demás incrementos. Para la simulación se han considerado 3 impuestos o incrementos: los impuestos indirectos, el impuesto de valor añadido (IVA) y el incremento del precio motivado por el margen de las gasolineras y el transporte [European10b].

Según los datos del “Market Observatory for Energy” [European12], los impuestos indirectos para la gasolina son 462,73 € por cada 1.000 litros, mientras que

para el gasoil son de 367,51 € por cada 1.000 litros actualizados a Julio de 2012. No obstante, estos valores pueden ir fluctuando a lo largo del tiempo, aunque el valor no será lo suficientemente significativo como para incluirlo de manera variable en la simulación.

Según esto, se han creado dos constantes en la simulación indicativas del impuesto indirecto para cada tipo de combustible:

$$\text{Impuestos indirectos gasolina} = 0.46273 \text{ €/l}$$

$$\text{Impuestos indirectos gasoil} = 0.36751 \text{ €/l}$$

Al multiplicar estos valores por los porcentajes de utilización de vehículos de gasolina y diesel en España respectivamente, se obtendrá el valor medio de los impuestos indirectos por litro de combustible.

$$\text{Impuestos indirectos medios} =$$

$$(\text{Porcentaje de vehículos diesel} * \text{Impuestos indirectos gasoil}) + (\text{Porcentaje de vehículos gasolina} * \text{Impuestos indirectos gasolina})$$

El otro impuesto a considerar es el I.V.A. Para la simulación se ha tomado el valor del 18% para los años 2010, 2011 y parte del 2012, y el valor del 21% a partir de septiembre de 2012. Lo que pueda pasar con este impuesto en el resto de los años de la simulación es una gran incógnita por lo que a partir de 2012 se ha decidido mantenerlo constante.

Para finalizar, el último valor con el que se incrementa el precio del petróleo es el margen que tienen las gasolineras, y el transporte del combustible. Para obtener este datos se ha realizado el cálculo de manera inversa, es decir, conociendo el precio del litro de combustible y los impuestos que se le aplican, y por otro lado, conociendo el precio de venta del combustible en las gasolineras, se estima experimentalmente que el último incremento a añadir es de un 25%.

Una vez calculados todos los incrementos sobre el precio del petróleo, la variable resultante es la siguiente:

*precio de litro de combustible al consumidor=*

*(precio litro de petroleo antes de impuestos+Impuestos indirectos medios)\*(1+IVA(Time))\*(1+Incremento del precio por margen de gasolineras y transportes)*

En este momento se ha calculado el precio del litro de combustible que el consumidor percibe, y el consumo medio que emplea un vehículo convencional para realizar un kilómetro, por lo que al multiplicar ambas variables con los kilómetros medios que realiza un vehículo que se calculó con anterioridad en el bloque de la batería, se obtendrá el coste anual que el cliente va a tener por el precio del combustible en los kilómetros recorridos de media en un año. La variable resultante es

*coste anual de VC por gasolina=*

*consumo medio de un VC \* km medios anuales del VE \* precio de litro de combustible al consumidor*

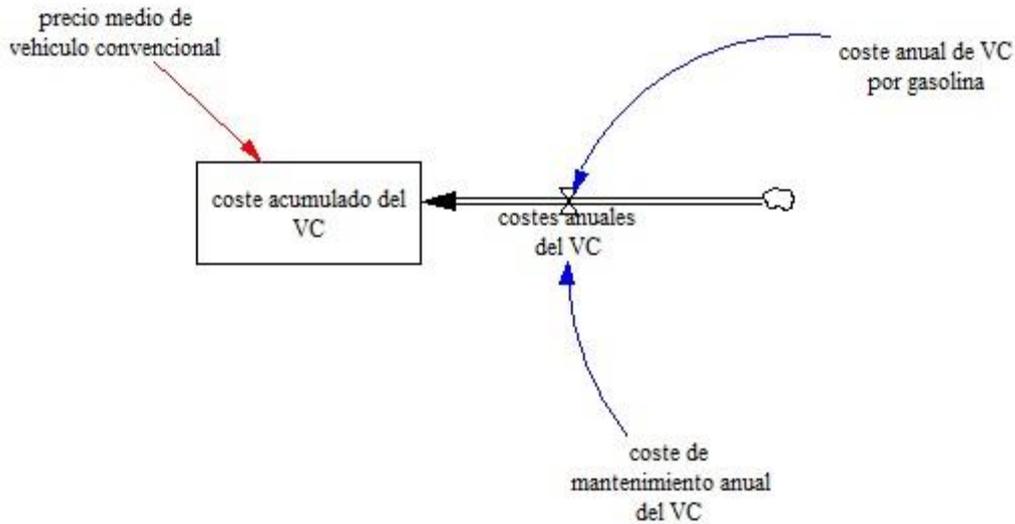
Según se ha comentado al inicio del sub-bloque, únicamente faltan por calcular los costes de mantenimiento que el vehículo convencional va a tener de manera anual y que van a representar una porción significativa del presupuesto de funcionamiento. Para ello se ha estimado el coste de mantenimiento que un vehículo convencional tiene a lo largo de su vida útil, y se ha relativizado al número de kilómetros que realiza hasta que se reemplaza. Según esto, el valor obtenido es de 0,03 € por cada kilómetro recorrido [Cee09], [Neenan10], [Pistoia10]. En estos mantenimientos están incluidos servicios tales como cambios de aceite y otros líquidos de servicio, reparación o reemplazo de transmisiones, piezas de motor, etc. Al multiplicar este valor por la variable que contiene los kilómetros medios anuales que recorre un vehículo, se dará lugar al valor económico que el cliente desembolsa de manera anual, debido al mantenimiento del vehículo convencional.

Una vez calculados ambos costes anuales debidos a la utilización del vehículo convencional, ambos son la entrada a un stock que será el coste acumulado del vehículo convencional.

*costes anuales del VC=*

*coste anual de VC por gasolina + coste de mantenimiento anual del VC*

En la figura se puede observar el diagrama resultante.

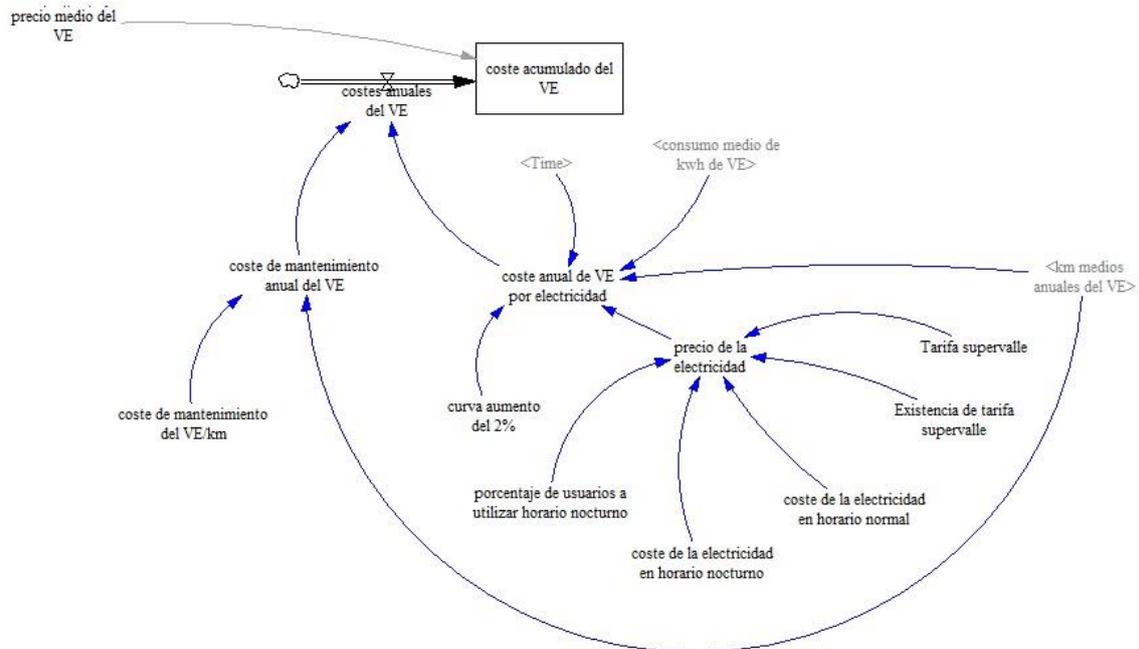


**Figura 50: Modelo del coste anual del vehículo convencional.**

Este stock almacena el coste total que va a tener el vehículo convencional a lo largo de su vida útil, por lo que el valor inicial del mismo debe ser el valor medio del vehículo convencional a la hora de comprarlo, al cual se irán añadiendo los diversos costes anuales por el consumo del vehículo y por el mantenimiento del mismo.

### ***Sub-bloque de Coste anual del vehículo eléctrico***

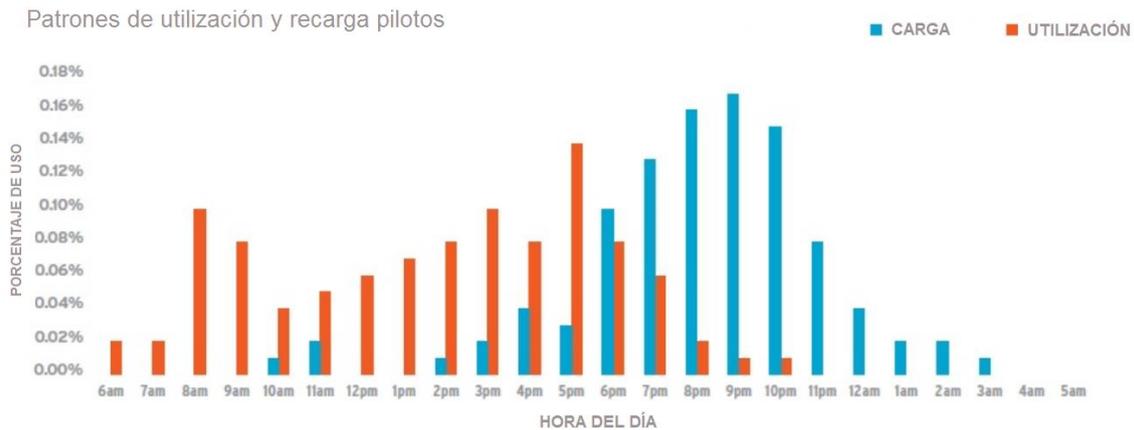
El último sub-bloque a estudiar, es el correspondiente al coste anual del vehículo eléctrico. El esquema es similar al del convencional, es decir, existe un coste anual debido al consumo que el vehículo va a tener por su utilización, y otro coste debido al mantenimiento del vehículo. En la siguiente figura se puede observar el modelo general del sub-bloque.



**Figura 51: Modelo del coste anual del vehículo eléctrico.**

El coste anual debido al consumo del vehículo eléctrico se calcula en base al precio de la electricidad. Para ello se tienen en cuenta diversas consideraciones. La primera es asumir que la mayoría de los usuarios que disponen de vehículo eléctrico, dispondrán de garaje (como se ha visto anteriormente en el sub-bloque del coste de compra del vehículo eléctrico), y que la mayoría de ellos (un 80% según RACE [Race]) cargarán el vehículo eléctrico en horario nocturno.

Este valor, además viene avalado por diversos estudios en puestos piloto en los que se analizan los patrones de utilización del vehículo eléctrico y de su carga. Así en la siguiente gráfica se puede observar los resultados de un estudio del “Idaho National Laboratory” [Electrification09].



**Figura 52: Patrones de utilización y recarga del vehículo eléctrico según el Idaho National Laboratory [Electrification09].**

Se puede observar claramente cómo la mayoría de las recargas se hacen durante el periodo de no utilización del vehículo, tendiendo siempre a su fase nocturna.

Antes de continuar con la explicación del sub-bloque, se ha considerado interesante hacer un breve inciso en la conveniencia de la carga nocturna de los vehículos eléctricos.

El vehículo eléctrico supone una nueva demanda de energía eléctrica que, gestionada de forma inteligente, ofrecerá al sistema eléctrico la posibilidad de mejorar su eficiencia global mediante un aplanamiento de la curva de demanda.

Esto es así siempre y cuando la recarga de los vehículos se realice fundamentalmente durante la noche, cuando los vehículos no están en uso y coincidiendo con los valles de demanda eléctrica del sistema.

Es en estos valles cuando el coste asociado a la generación de electricidad es menor, dándose además la circunstancia de que trasladar demanda a dichos valles contribuye de forma activa a incrementar la integración de las energías renovables (básicamente eólica) que tienen la problemática de ser intermitentes, cuya potencia máxima producible en cada momento depende de un recurso primario que no es controlable ni almacenable y posee una variabilidad muy significativa.

Es muy interesante destacar que la red de distribución actual ya es capaz de soportar la recarga de un millón de vehículos eléctricos, sin necesidad de acometer nuevas inversiones en las infraestructuras, siempre que se utilice la carga lenta en

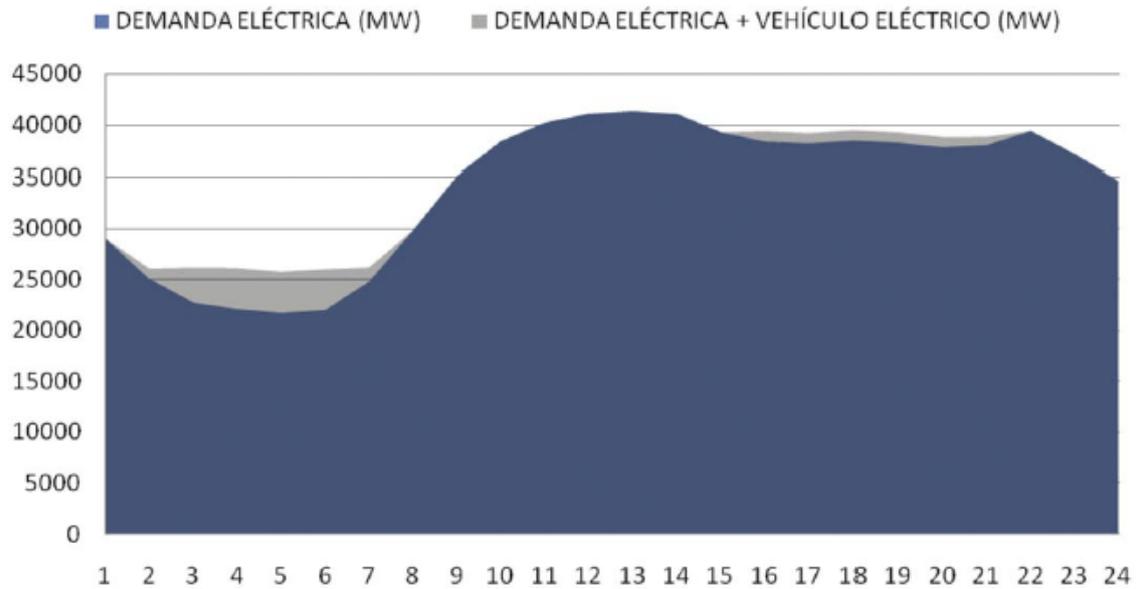
alterna y monofásica, principalmente por la noche, lo que supondría incrementar únicamente un 1% la demanda [Laboratorio09].

En la actualidad, en los valles de demanda hay que mantener conectada una generación gestionable que se va a utilizar para asegurar la subida de la curva hasta la punta de la mañana. Actualmente, se necesita tener muchos grupos a muy poca potencia para después ir incrementándola para asegurar la potencia por la mañana. Pero por ejemplo, si sopla demasiado viento por la noche, es posible que exista mucha energía que se tiene que verter. Esto ocurre porque se tiene un valle muy profundo, que, además, se ha agudizado con la actual crisis económica.

Las alternativas para solucionar este problema consisten en primer lugar en los intercambios de energía con los países vecinos, pues se pueden colocar los excedentes de generación a través de las exportaciones. Otra opción es el incremento de la capacidad de almacenamiento, es decir, crear una especie de demanda inducida, que permita elevar el valle y abrir más hueco para que entren las energías renovables pero es bastante difícil. Después, el almacenamiento de energía eólica, aunque todavía está en un estado bastante prematuro; y en último lugar, la introducción a gran escala del vehículo eléctrico.

El vehículo eléctrico puede ser una oportunidad, pero también una amenaza. Si se consigue que sea una oportunidad para el sector eléctrico, debido a la realización de una recarga inteligente en los valles, se conseguiría además una mayor integración de energías renovables, lo cual va a redundar doblemente en los aspectos de mejora de la calidad ambiental. Primero, porque el coche eléctrico no va a emitir CO<sub>2</sub> en su utilización y segundo, en tanto que se recargue por la noche va a permitir una mayor integración de renovables, y por lo tanto con menos emisión de CO<sub>2</sub> en el mix energético. Por lo tanto el efecto es doble si se hace una adecuada recarga por la noche.

La recarga lenta con gestión inteligente consigue optimizar al máximo el relleno del valle y, por lo tanto, la mayor integración de renovables, como se puede observar en la siguiente figura.



**Figura 53: Optimización de la curva de la demanda energética con el vehículo eléctrico [Santamarta09].**

La recarga rápida tiene, sin duda, también ventajas para los usuarios, pero para el sistema eléctrico es una complicación. No sólo para la operación del sistema, sino también posiblemente para las redes de distribución, cuyas capacidades habrá que redimensionar, porque la potencia instantánea que se demanda es mucho más elevada. En la siguiente figura se puede ver un ejemplo de una recarga rápida.



**Figura 54: Crecimiento de la demanda eléctrica por los cargadores rápidos [Laboratorio09].**

Se ve que si en la punta de la tarde, se intentan recargar los coches en media hora, se tendría un incremento de la punta de cerca de siete mil megavatios. Lo que

significa que se comenzaría a tener problemas de capacidad de generación, ya que no se cubriría el índice de sobre-equipamiento que hay que tener de al menos un 10% para cubrir indisponibilidades de los grupos, y habría que acudir a un nuevo proceso de remodelación del sistema de generación, transporte y distribución. Es decir, habría que hacer un mayor sobredimensionamiento del sistema y se tendría una peor eficiencia y rentabilidad de la generación convencional. Si se consiguiera levantar la demanda en valle, se obtendría una utilización algo más alta, lo que permitiría también tener una mayor rentabilidad del equipo de generación convencional.

En resumen, la recarga lenta de los vehículos en horario valle tiene varias ventajas: la suficiencia de las infraestructuras sin tener que acometer modificaciones, su mayor y mejor uso, y por último, la mejor integración de renovables. Desde el punto de vista del usuario tiene las ventajas de realizar las recargas en horas de poco uso del vehículo y obtener un ahorro por el diferencial de coste de la electricidad del día y la noche.

Antes de calcular el coste de la electricidad, hay que diferenciar entre las discriminaciones horarias existentes a la hora de seleccionar una tarifa eléctrica ya que va a variar significativamente el coste de la misma.

El usuario final va a poder elegir una tarifa sin discriminación horaria, es decir, el precio de la electricidad va a ser constante a lo largo de todo el día, una tarifa con discriminación horaria en dos periodos, con un periodo diurno de mayor coste y uno nocturno de un coste inferior, y por último, la denominada tarifa superval. Esta tarifa está pensada para favorecer que las cargas de los vehículos eléctricos se realicen durante la noche, y con ello mejorar la curva de carga como se ha explicado anteriormente, tal y como viene reflejado en la “Estrategia Integral para el Impulso del Vehículo eléctrico en España” [Industria10b]. En el Real Decreto 647/2011 se crean los peajes de acceso para consumidores de baja tensión con potencia contratada hasta 15 kW. Para ello diferencia 3 tipos de períodos tarifarios.

Período tarifario	Duración	Horario
P1	10 horas/día	13:00-23:00
P2	8 horas/día	23:00-1:00;07:00-13:00
P3	6 horas/día	01:00-07:00

**Tabla 9: Horarios y duración de los periodos tarifarios.**

El denominado P3 es el período supervalle que dispondrá de un horario de 1 de la madrugada a 7 de la mañana. Se aplicará en esas horas ya que son las de menor consumo eléctrico en nuestro país.

Como se ha mencionado, el precio para el usuario final va a variar significativamente dependiendo de la discriminación horaria que seleccione. Si no existe discriminación horaria, el precio del kWh será constante independientemente del horario en el que se consuma. En el caso de que exista discriminación horaria en dos periodos, si bien es cierto que el periodo nocturno implica una fuerte reducción de precio (más del 50%), el periodo diurno, implica un aumento de precio respecto a la tarifa sin discriminación horaria (cerca de un 25%). Respecto a la tarifa supervalle el resultado es similar, pero con una mayor diferenciación económica entre los tres tramos.

Los datos suministrados por el Ministerio de Energía según la resolución del 28 de junio de 2012 publicada en el B.O.E. A-2012-8676, a partir del 1 de julio de 2012 son:

- Sin discriminación horaria, el coste será de 0,149198 €/kWh.
- Discriminación en dos periodos:
  - Periodo 1: 0,180838 €/kWh.
  - Periodo 2: 0,067940 €/kWh.
- Discriminación horaria supervalle:
  - Periodo 1: 0,180508 €/kWh.
  - Periodo 2: 0,077160 €/kWh.
  - Periodo 3: 0,059725 €/kWh.

A la vista de los datos, se puede concluir con que la tarifa con discriminación horaria en dos periodos y la tarifa supervalle, de cara a la carga del vehículo eléctrico no

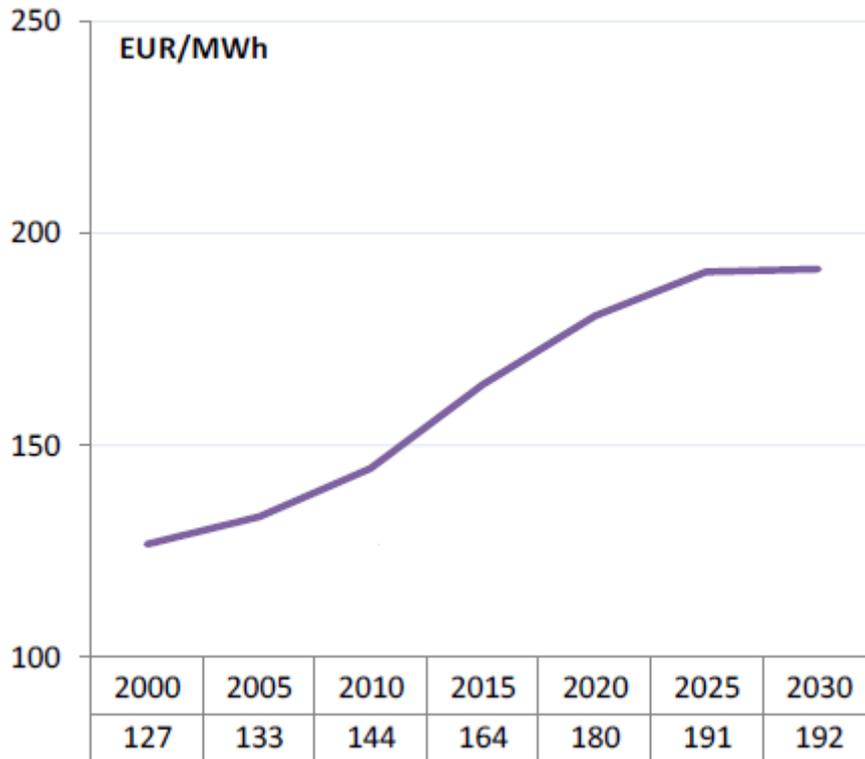
va a tener una diferencia significativa puesto que el vehículo eléctrico va a tener que ser cargado en los periodos 2 y 3 (visto en los hábitos de carga anteriormente explicados), y la diferencia económica del periodo 3 de la tarifa supervalle con el periodo 2 de la tarifa con discriminación en dos periodos es muy poco significativo, lo que hace no considerar la tarifa supervalle para el modelo final.

Según esto, y de cara a la simulación, se va a trabajar con dos variables, una que contenga el precio de la electricidad en horario diurno, y otra que contenga el valor de la electricidad en horario nocturno.

Como es lógico, estos valores no van a ser fijos, ya que irán sufriendo actualizaciones de precios. No parece previsible que en los próximos 10 años el precio de la electricidad vaya a permanecer invariable. Después de analizar numerosas publicaciones y estudios entre los cuales cabe destacar los de la Comisión Europea de la Energía [European10a], los de la U. S. Energy Information Administration [Useia10], y los encargados por el Gobierno Federal Alemán [Ewi10] existe una gran incertidumbre de información debido a la gran dispersión de los datos obtenidos sobre la evolución del precio de la electricidad. Tampoco se pueden extrapolar datos a partir de los valores de los últimos años, debido a la modificación continua de las tarifas debido al déficit tarifario del sistema eléctrico.

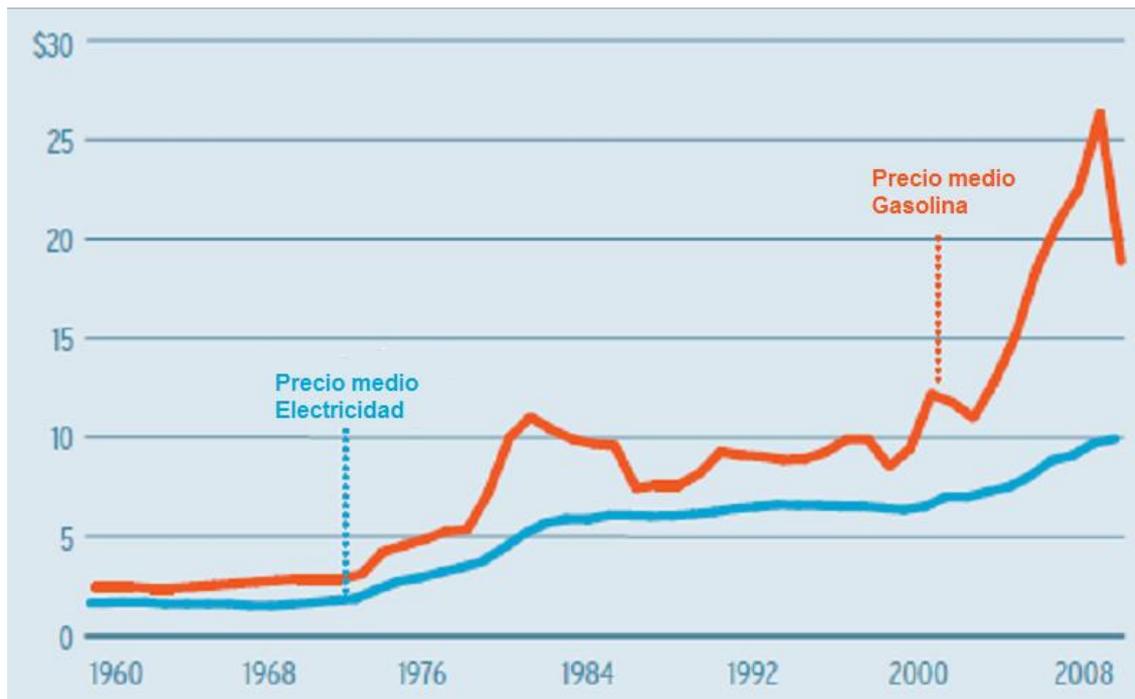
A grandes rasgos, se puede definir el déficit tarifario, como a la diferencia entre el coste real de producción de la energía eléctrica (tanto producirla como transportarla y distribuirla) y la tarifa fijada. Esto va generando, según las compañías eléctricas y el propio Gobierno, una deuda que, año a año va acumulándose. Debido a esto, las tarifas van a sufrir una fluctuación difícilmente calculable.

A pesar de esta incertidumbre, y para realizar un modelo más realista que con un precio de la electricidad constante, se ha tomado como mejor aproximación la indicada por la Comisión Europea de la Energía [European10a] dada por la curva que se muestra en la figura siguiente que será incluida en la variable del precio de la electricidad diurno.



**Figura 55: Previsión del aumento del precio de la electricidad después de impuestos según la Comisión Europea de la Energía [European10a].**

Al igual que sucedía con el precio del petróleo, la estimación para los próximos años es muy complicada de realizar, pero en este caso, el precio de la electricidad es significativamente menos volátil que el de la gasolina. A modo de ejemplo se puede ver en la siguiente figura una comparativa entre los precios de la gasolina y de la electricidad en los Estados Unidos en los últimos años donde se puede observar la variabilidad de ambos precios [Electrification10b].



**Figura 56: Comparativa de la evolución de los precios de la gasolina y de la electricidad en EE.UU. [Electrification10b].**

Respecto al horario nocturno, la dificultad es aún mayor al tener en cuenta la fluctuación que pueda tener también la tarifa supervalle. Para simplificar estos cálculos, se ha extrapolado las últimas actualizaciones de precios, considerando una subida de un 5% anual el valor de la electricidad en horario nocturno. Obviamente este valor no predice lo que va a ocurrir en términos de costes, pero sí que da una aproximación más realista a lo que puede suceder frente a dejarlo de manera constante. El valor de inicio respecto al que se le irá añadiendo el 5% anual será de 0,060736 €/kWh que era el valor publicado en el B.O.E. A-2010-10392 del 30 de junio de 2010 para el valor de esta tarifa. Si a este valor se le aplica el 5% de subida anual, se comprueba que el valor que se obtiene para el año 2012 es de 0,067 que es aproximadamente el valor que indica el B.O.E. A-2012-8676 del 29 de junio de 2012 para el precio de esta tarifa a partir de julio de 2012, lo que nos indica que la aproximación del 5% de subida es válida.

La siguiente dificultad estriba en calcular cuántos usuarios van a cargar en horario nocturno, y cuántos de ellos, van a haber contratado una tarifa con discriminación horaria.

Obviamente, la existencia de esta diferencia económica a la hora de la carga del vehículo eléctrico, va a implicar que consumidores que anteriormente recargaban el

vehículo eléctrico en un horario distinto al nocturno, se cambien a este horario. Para ello, se tiene que utilizar estimaciones en función a los estudios existentes [Race], que indican que el 80% de los usuarios cargaría en horario nocturno y el 20% en diurno. Se ha asumido que todos los usuarios que cargan en horario nocturno, se acogen a una tarifa de discriminación horaria puesto que como se verá posteriormente son los denominados “innovadores” y se sienten fuertemente implicados con el vehículo eléctrico.

Según esto, la variable que recoge el precio medio de la electricidad será la siguiente:

*precio de la electricidad=*

*(porcentaje de usuarios a utilizar horario nocturno\*coste de la electricidad en horario nocturno\*aumento del precio de la tarifa nocturna(Time))+(coste de la electricidad en horario normal(Time)\*(1-porcentaje de usuarios a utilizar horario nocturno))*

Una vez que se ha obtenido el precio medio de la electricidad (por cada kWh consumido), y conociendo el valor de los kWh que son necesarios para que un vehículo eléctrico pueda recorrer un kilómetro, se puede obtener el coste que tendrá un vehículo eléctrico por cada kilómetro que recorra. Si este valor se multiplica por el número de kilómetros medios anuales que realiza el vehículo, se podrá determinar el coste anual por la electricidad consumida del vehículo eléctrico.

Con esto, la variable del coste anual del vehículo eléctrico debido al consumo eléctrico queda de la siguiente manera

*coste anual de VE por electricidad=*

*consumo medio de kwh de VE\*km medios anuales del VE\*precio de la electricidad*

Por último, sólo falta realizar el cálculo del coste de mantenimiento del vehículo eléctrico. El modo de calcularlo es idéntico al realizado para el vehículo convencional. El coste de mantenimiento que un vehículo eléctrico tiene a lo largo de su

vida útil relativizado al número de kilómetros que realiza hasta que se reemplaza es de 0,02 € por cada kilómetro recorrido [Cee09], [Neenan10], [Pistoia10]. Al multiplicar este valor por la variable que contiene los kilómetros medios anuales que recorre un vehículo, se obtiene el valor económico que el cliente desembolsa de manera anual, debido al mantenimiento del vehículo eléctrico.

Hay que resaltar que, como se puede observar, el coste del mantenimiento por kilómetro realizado es notablemente inferior en el vehículo eléctrico frente al convencional (un 33% inferior). Esto es debido a que los motores eléctricos, no tienen una alta variedad de partes sometidas a trabajo lo que implica que no es necesario un mantenimiento continuo tan exhaustivo como en los motores de combustión interna. De hecho, el motor eléctrico tiene una única parte móvil, el eje, el cual es muy fiable y requiere poco o ningún mantenimiento. Otro factor muy importante, es la eliminación del aceite, lo que implica que no es necesario realizar los cambios periódicos del mismo. En el vehículo eléctrico no existen sistemas de transmisión, ni bombas de combustible, ni inyección, lo que también minimiza el mantenimiento [Werber09]. El hecho de que el motor eléctrico sea más sencillo que el de combustión interna, reducirá el riesgo de averías por su simplicidad.

Por último, y al igual que sucedía en el caso del vehículo convencional, los costes anuales debidos a la utilización del vehículo son la entrada a un stock que será el coste acumulado del vehículo eléctrico.

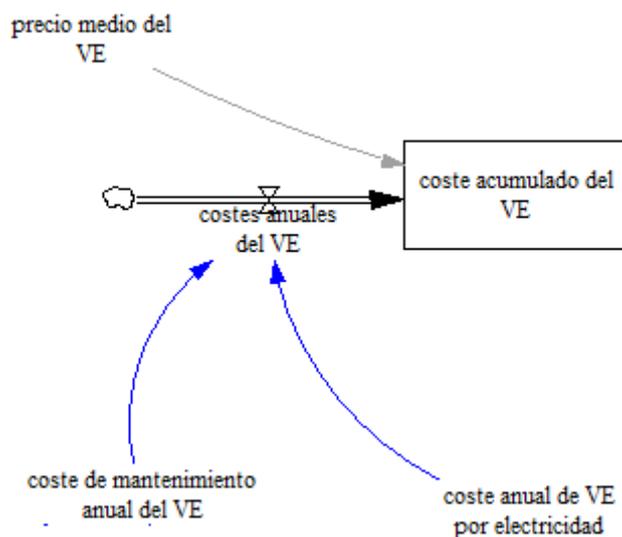


Figura 57: Modelo del stock del coste anual del vehículo eléctrico.

Este stock almacena el coste total que va a tener el vehículo eléctrico a lo largo de su vida útil, por lo que el valor inicial del mismo debe ser el valor medio del vehículo eléctrico a la hora de comprarlo, al cual se irán añadiendo los diversos costes anuales por el consumo eléctrico del vehículo y por el mantenimiento del mismo.

Para resumir, el TCO se describe según la siguiente expresión:

$$TCO = \text{Coste de adquisicion}(y) + \sum_{t=y}^{2020} (\text{Coste combustible}(t) + \text{Coste mantenimiento}) \quad (1)$$

donde “y” es el año de compra. Tal y como se ha explicado anteriormente, los costes anuales para ambos vehículos están determinados por los costes del combustible y por los costes de mantenimiento desde el año de la compra del vehículo hasta el año 2020 que es cuando termina la simulación. Obviamente, estos costes serán variables en el tiempo debido a las variaciones en el precio de los combustibles anteriormente explicados así como en el número de kilómetros recorridos de media cada año.

## 5.5 Bloque del atractivo del vehículo eléctrico

El bloque del atractivo del vehículo eléctrico es el bloque más complejo del modelo. En él interrelacionan numerosas variables para cuantificar lo atractivo que el vehículo eléctrico le resulta al cliente potencial.

La población toma la decisión de utilizar una nueva tecnología en cuanto a la propulsión del vehículo se refiere, comparando los atributos de esta nueva tecnología con las otras disponibles en el mercado. La perspectiva neoclásica del comportamiento del consumidor indica que la elección del consumidor se basa en la utilidad del producto desde su perspectiva y que la elección de otro producto sin maximizar esta utilidad se denomina “irracional” [Himmelweit01]. Sin embargo, la perspectiva institucional del comportamiento de los consumidores sugiere que las elecciones también están asociadas al comportamiento social, donde los consumidores por ejemplo, quieren mostrar su riqueza a otros miembros de una sociedad [Himmelweit01]. En resumen, hay dos principales influencias que afectan al comportamiento del consumidor, la utilidad del producto y el comportamiento social.

Obviamente, el vehículo eléctrico va a tener bastantes ventajas frente al resto de alternativas en el mercado, pero también un número importante de desventajas. En este bloque se pretende estudiar en qué manera afectan al posible consumidor dichas características y cuales pesan más en su decisión final.

En la siguiente figura se pueden observar los criterios en los que un comprador se basa para determinar el vehículo a adquirir [McKinsey09].



**Figura 58: Criterios de elección de un comprador de un nuevo vehículo. [McKinsey09].**

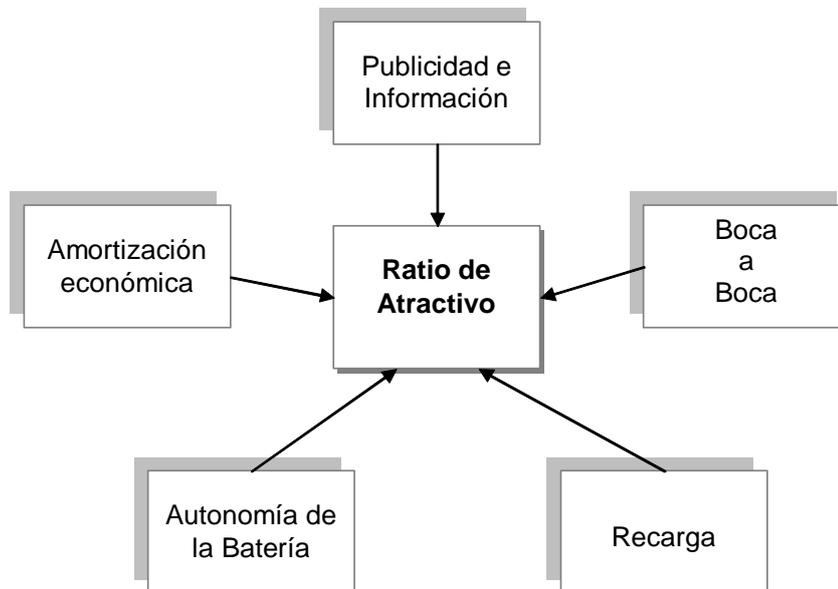
En base a estos criterios, se ha pretendido extraer las características específicas que el vehículo eléctrico pueda tener para hacerle más atractivo que el vehículo convencional.

Lógicamente el primer criterio es el más fundamental y es el que está relacionado con el coste de adquisición y las expectativas que vayan a tener sobre el vehículo y más en la situación financiera que en los últimos años existe. Esto se ha modelado mediante la amortización económica que se vaya a tener respecto al vehículo convencional. El aspecto de fiabilidad se modelará también en la amortización económica puesto que como se explicó anteriormente, el coste de mantenimiento del vehículo eléctrico es inferior al del convencional.

También existen unas características específicas inherentes al vehículo eléctrico que lógicamente no van a estar en el estudio anterior como son la autonomía de la batería, los puntos de recarga, etc. que sí se deben modelar.

Por otra parte, existen una serie de criterios que son independientes de si el vehículo a adquirir es eléctrico o no, como son la manejabilidad, la confortabilidad, la seguridad, el diseño y la marca. Según esto, esta serie de criterios no se han modelado como una característica especial del vehículo eléctrico, puesto que realmente dependerán más de la marca del vehículo que del tipo de motor que posea el vehículo.

Un diagrama a grandes líneas del modelo del bloque se puede ver en la figura 59.

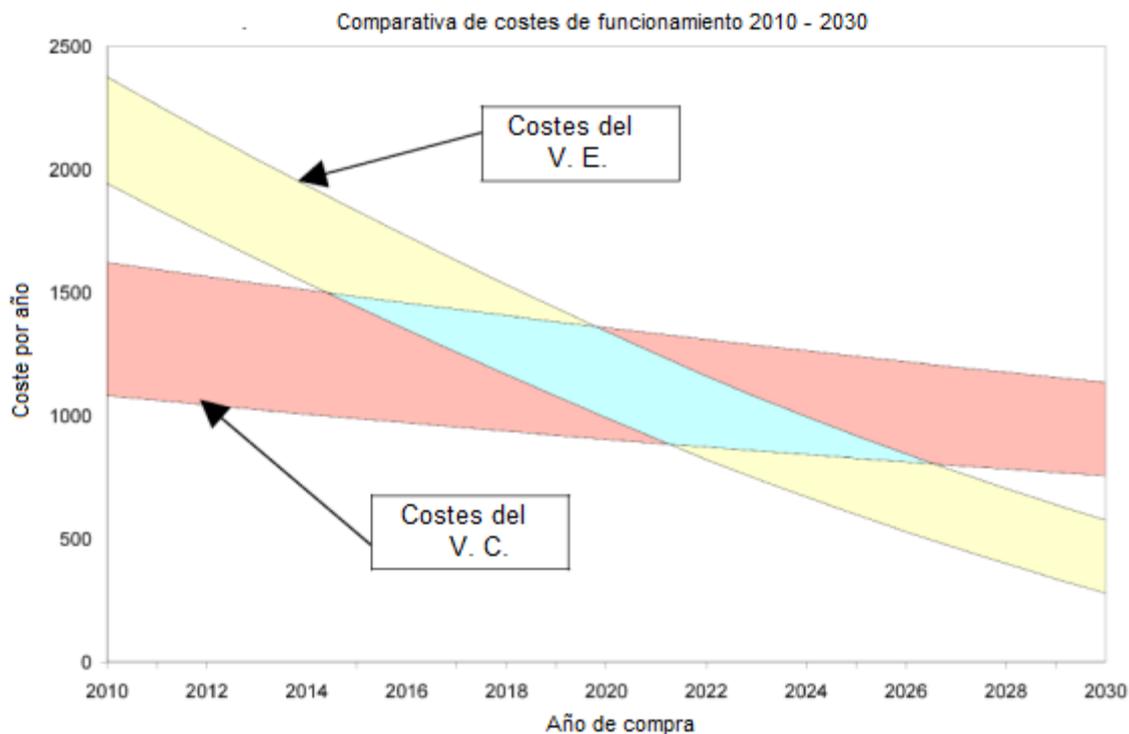


**Figura 59: Diagrama de bloques del ratio de atractivo.**

Como se ha dicho anteriormente, hay numerosos factores que pueden influir en el atractivo del vehículo eléctrico hacia el cliente. Para este modelo, se han tenido en cuenta las cinco que parecen más significativas en función de lo explicado: la amortización económica, la autonomía de la batería, todo lo relacionado con la recarga, el “boca a boca” que pueda existir, y por último, la publicidad e información que exista respecto al vehículo eléctrico.

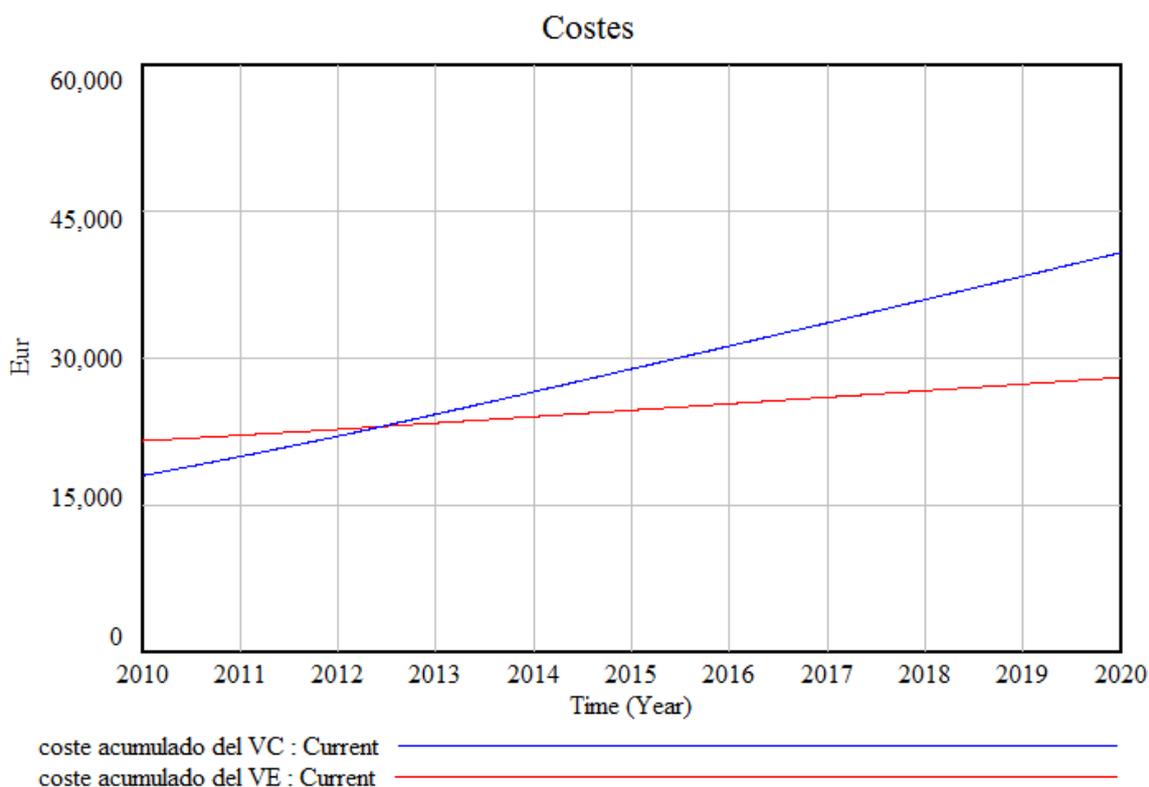
### ***Sub-bloque de Amortización económica***

El primer sub-bloque a analizar es el de la amortización económica, que a su vez es el más significativo en cuanto al atractivo que pueda tener un vehículo se refiere como se vio en la figura 58. Por todos es conocido que una de las principales barreras a la implantación del vehículo eléctrico es su elevado precio, muy superior al de un vehículo convencional de características similares (realmente superiores, puesto que tiene una autonomía mayor) principalmente motivado por el elevado coste de las baterías como se vio anteriormente y por los bajos volúmenes de producción. Su cálculo se determina atendiendo a los costes de compra y de explotación del vehículo eléctrico y del convencional (TCO), el tiempo en que tarda en amortizarse la inversión de uno frente al otro. Es decir, en cuantos años la sobre-inversión por la compra del vehículo eléctrico, al cliente le sale rentable. Obviamente, cuantos más años tarde en amortizar la inversión, menos atractivo tendrá el vehículo eléctrico para el cliente potencial. Este cálculo se obtiene a partir del bloque de costes del vehículo eléctrico. En él se calculaban los costes tanto de compra como de explotación de ambos tipos de vehículos. Si se realiza la comparación de las curvas TCO de ambos tipos de vehículos, la curva del vehículo convencional va a comenzar en un valor más bajo que la del vehículo eléctrico debido a que su precio de compra es inferior, pero por contra, va a tener una pendiente muy superior ya que los gastos de utilización son superiores (debido al coste del petróleo y mantenimiento). Por tanto, hay que determinar en qué momento ambas curvas se cruzan, y ese será el punto de amortización del vehículo eléctrico frente al vehículo convencional. En la siguiente figura se puede ver una representación gráfica de lo descrito.



**Figura 60: Cruce de las curvas de costes de funcionamiento del vehículo eléctrico y del convencional sin tener en cuenta los costes de adquisición [Berr08].**

Traduciendo esto al modelo creado, en la siguiente gráfica se puede observar un ejemplo ilustrativo obtenido en la simulación.



**Figura 61: Ejemplo de los costes acumulados de los dos tipos de vehículos con fecha de adquisición del vehículo eléctrico de 2010.**

En el ejemplo, se ve cómo pese a que el coste inicial del vehículo eléctrico (línea roja) es superior al del vehículo convencional (línea azul), al cabo de ciertos años, el vehículo eléctrico es más rentable, y el coste acumulado del mismo es muy inferior a lo largo de los años respecto al del vehículo convencional. Como era de esperar, la curva de costes del vehículo eléctrico tiene una pendiente inferior respecto a la del vehículo convencional motivado por unos inferiores costes de mantenimiento y por un inferior precio de la electricidad frente al de la gasolina, pero siempre partiendo del coste de adquisición de ambos vehículos.

Estas curvas no van a ser siempre idénticas, puesto que como se ha visto con anterioridad en diversos bloques, los costes irán variando con el tiempo. No tendrá el mismo coste de compra de un vehículo eléctrico un cliente que lo compre en el 2011, a otro que lo compre en el 2018 por ejemplo. Esto es lo que se ha modelado en la variable denominada “Ratio de amortización del VE vs VC”, creando para ello un bucle de comparaciones anuales.

El modelo será el siguiente

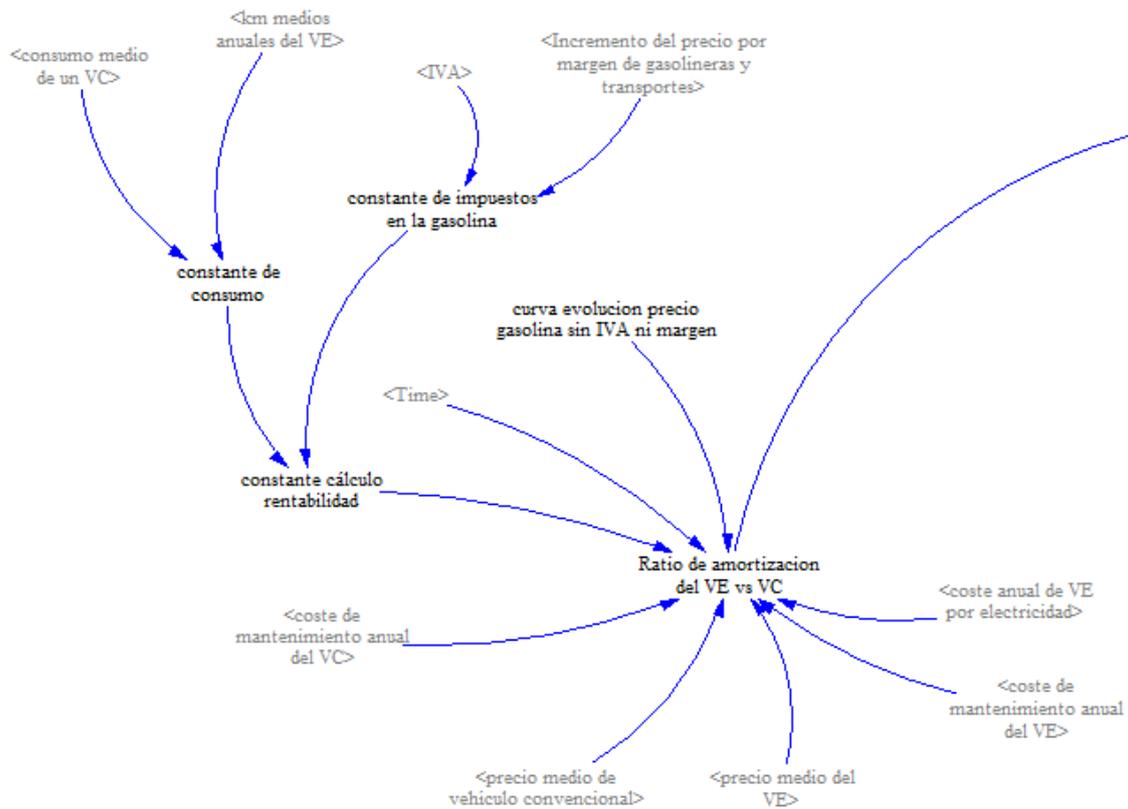


Figura 62: Modelo de la rentabilidad económica.

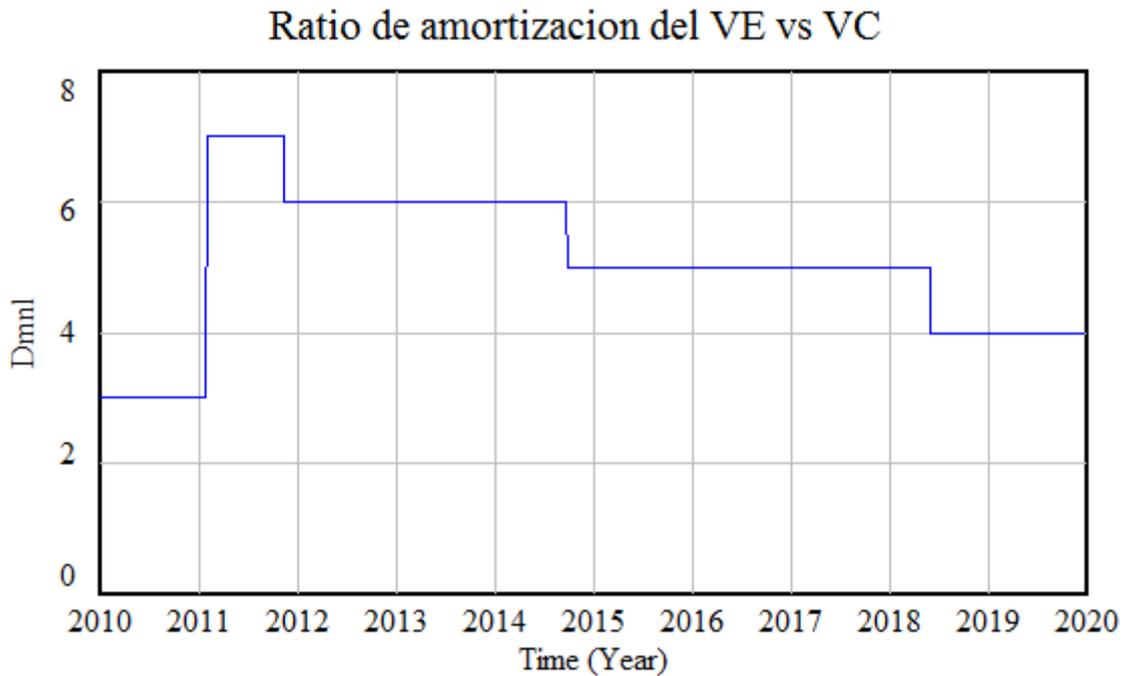
Si se observan las variables la gran mayoría de ellas han sido o bien utilizadas o calculadas en el bloque de costes, por lo que no requieren una nueva explicación. Las únicas variables nuevas son variables creadas para poder realizar el bucle de comparación de una manera matemática sencilla. Se han ido agrupando las variables en constantes, y de ahí se calcula el rendimiento. Esto es necesario debido a la propia idiosincrasia de la Dinámica de Sistemas, puesto que no permite realizar bucles.

Con todas estas agrupaciones se puede establecer un modelo cuya programación en Vensim que se recoge en el anexo de programación con el nombre de variable “Ratio de amortización del VE vs VC”.

Puesto que la variable es bastante compleja, es más interesante comprender las dos primeras comprobaciones del bucle puestas que las demás son idénticas.

*IF THEN ELSE((precio medio del VE+coste de mantenimiento anual del VE+coste anual de VE por electricidad)<=(precio medio de vehículo convencional+coste de mantenimiento anual del VC+(constante cálculo rentabilidad\*curva evolución precio gasolina sin IVA ni margen(Time))),1 , IF THEN ELSE((precio medio del VE+coste de mantenimiento anual del VE\*2+coste anual de VE por electricidad\*2.02)<=(precio medio de vehículo convencional+coste de mantenimiento anual del VC\*2+(constante cálculo rentabilidad\*(curva evolución precio gasolina sin IVA ni margen(Time))+curva evolución precio gasolina sin IVA ni margen(Time+1))), 2*

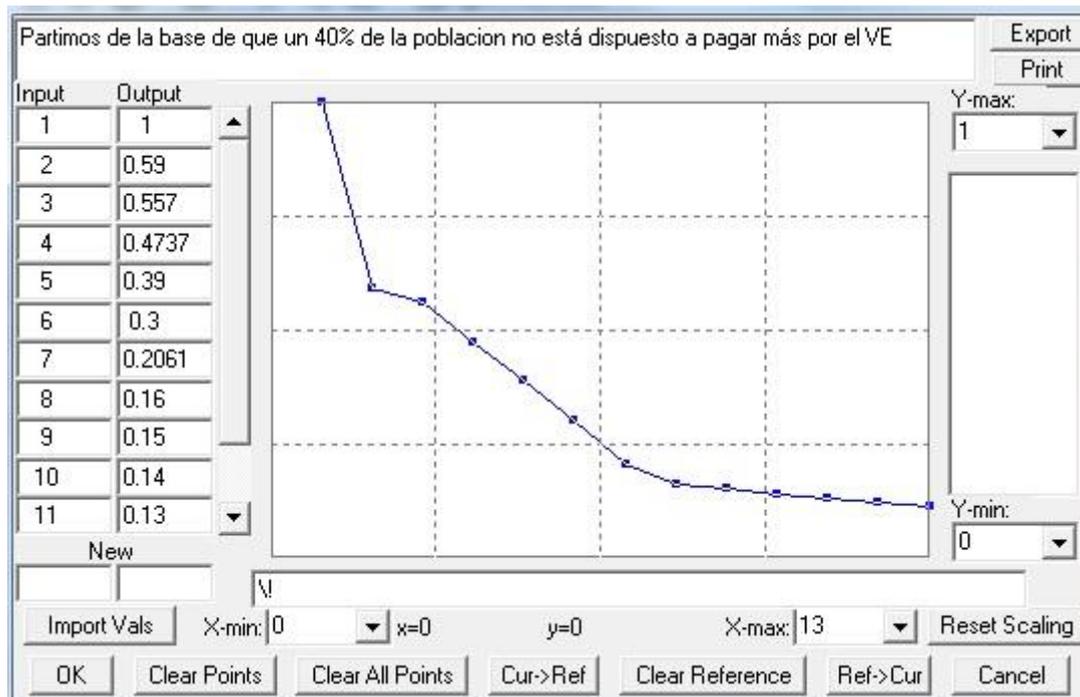
Si el precio de compra del vehículo eléctrico sumado al mantenimiento del primer año, o año actual, e incrementado con el coste del primer año de electricidad es menor o igual a los mismo costes pero referenciados al vehículo convencional, significará que el periodo de amortización es de un año, es decir, el coche eléctrico es más rentable que el convencional en un único año. En caso negativo, habrá que continuar con el siguiente año: acumulando los costes del primer año a los de este segundo año, y considerando los incrementos tanto del precio de la electricidad como del petróleo. Si al hacer la comparación en este segundo año de vida, el coste total del vehículo convencional es superior al del vehículo eléctrico, éste último se amortizará en dos años. Así se continuaría sucesivamente hasta un máximo de 10 años, en el cual se determina que con una amortización de 10 años o superior, los clientes potenciales tendrá un bajo interés por el vehículo eléctrico en cuanto al factor económico se refiere. Un ejemplo de este valor a lo largo del tiempo se puede observar en la siguiente gráfica.



**Figura 63: Ejemplo de los años de amortización en función de la fecha de compra.**

Se puede observar en la gráfica que en función del año de adquisición del vehículo eléctrico, los años de amortización del mismo variarán notablemente. En la gráfica simulada se observa como un cliente que adquiriera el vehículo eléctrico en el año 2012 tardará 6 años en recuperar la sobre-inversión realizada frente al vehículo convencional, mientras que ese mismo cliente potencial que adquiriera el vehículo en el año 2019 solamente tardará 4 años en recuperar la sobre-inversión, lo cual viene motivado por las reducciones de los vehículos eléctricos por los avances en las tecnologías, así como por los mayores niveles de producción. Lógicamente este valor de los años en recuperar la sobre-inversión estará directamente relacionado con el escenario simulado.

Una vez se ha obtenido el valor en años del tiempo de amortización, se tiene que cruzar con una curva que muestra el interés económico del cliente potencial, es decir, dependiendo de los años de amortización, el porcentaje de la población que estaría dispuesta a adquirir un vehículo eléctrico. Dicha curva es la que se muestra en la figura siguiente, la cual está almacenada en la variable “efecto del tiempo de amortización del VE frente al VC”.



**Figura 64:** Curva de descenso del atractivo en función del precio del vehículo eléctrico.

Para construir esta curva se ha tomado como dato inicial los estudios que indican que un 40% de la población está en desacuerdo con desembolsar más dinero por un vehículo eléctrico de similares características y prestaciones que uno convencional [Race]. Por lo tanto, se ha tomado como dato inicial que si el vehículo eléctrico no se amortiza en un único año, es decir, si existe una inversión inicial muy superior frente al vehículo convencional, hay un 40% de la población que no va a desear adquirirlo por lo que el valor para el año 2 es de un 59% de población. El resto de la curva se ha estimado, puesto que como es lógico, aun no existen datos de este tipo. La estimación es de manera casi lineal hasta un valor que se ha determinado como intermedio (año 7) y posteriormente se mantiene casi constante con una pequeña pendiente a medida que aumenten los años. Se asume que con valores de años de amortización pequeños (entre 2 y 5) el porcentaje de población que estaría dispuesto a adquirir un vehículo eléctrico aun sería relativamente elevado, pero a medida que los años de amortización aumentan, el porcentaje de población disminuye drásticamente, considerando valores inferiores al 14% con 10 años de amortización. El valor de la curva nunca será del 0%, puesto que pese a que los años de amortización sean muy elevados, un grupo de la población (por muy pequeño que sea) siempre estará dispuesto a adquirir el vehículo (los denominados innovadores) como se verá posteriormente en el ciclo de aceptación de una nueva tecnología [Moore91].

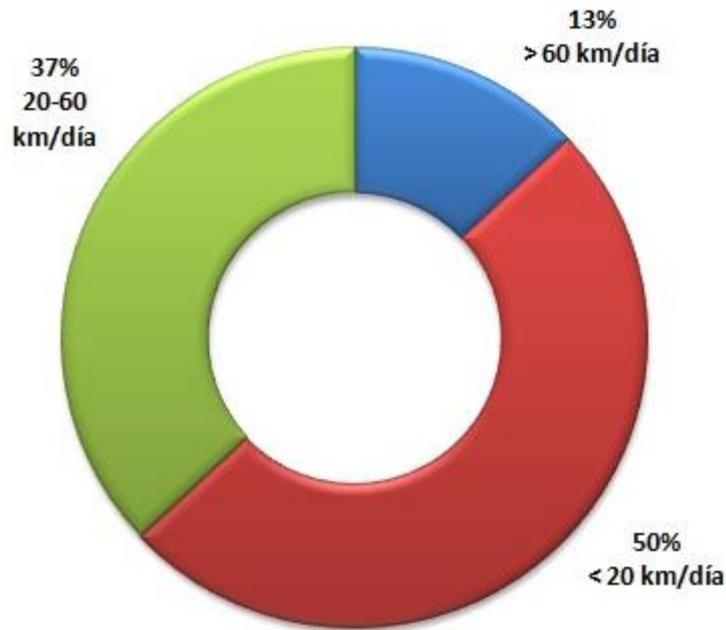
En resumen, con el cruce del valor en años del periodo de amortización del vehículo eléctrico frente al convencional, y la curva del efecto de la amortización de la población, se obtiene resultado del sub-bloque de amortización económica.

### ***Sub-bloque de Autonomía de la batería***

Uno de los principales inconvenientes del vehículo eléctrico en la actualidad es la limitada autonomía de la que dispone. Como se ha explicado en el bloque de la batería, para el desarrollo de este estudio, se parte de la premisa de una batería con autonomía de aproximadamente 160 kilómetros, que se irá desarrollando en el tiempo a medida que evolucione el mercado. Si bien es cierto que en los estudios publicados se indica que una autonomía de 160 kilómetros es más que suficiente para la vida cotidiana [Gas10], el sólo disponer de 160 kilómetros frente a los 400 kilómetros o incluso más de los que dispone un vehículo convencional, ejerce un factor psicológico importante en los posibles compradores. Evidentemente en estos kilómetros denominados cotidianos hay que excluir los viajes de larga distancia en días festivos por ejemplo o profesionales que viajan de forma habitual.

Al analizar los datos existentes, existe una clara tendencia al establecimiento de la vivienda en el lugar de trabajo. Según esto, en el año 2007, más del 50% de la población mundial vivía en ciudades, y la previsión es que en el año 2050 esta cifra sea superior al 70% [Gas10]. Este dato es muy significativo de cara al vehículo eléctrico, puesto que su principal utilización se centra actualmente en las ciudades.

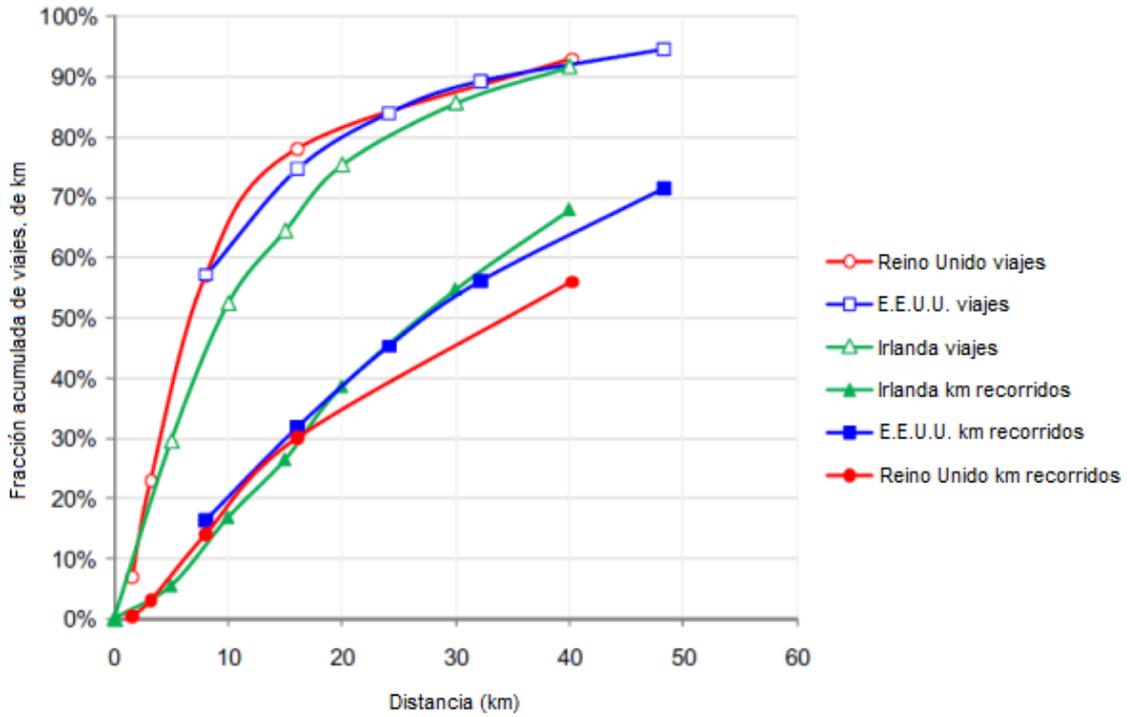
El segundo dato a tener en cuenta es el tipo de trayectos que realiza un conductor diariamente. En la siguiente figura se muestran los hábitos de conducción medios actuales en España.



**Figura 65: Hábitos de conducción medios en España [Gas10].**

Se puede observar en la figura que, el 87% de los trayectos diarios, corresponden a distancias inferiores a 60 kilómetros [Gas10] mientras que únicamente un 13% son trayectos superiores a 60 kilómetros.

Al compararlo con otros países se puede observar que los resultados son análogos. En la siguiente figura se puede observar los porcentajes de kilómetros que se recorren por viaje en EE.UU., Reino Unido e Irlanda.



**Figura 66: Porcentajes de kilómetros que se recorren por viaje en EE.UU., Reino Unido e Irlanda [Smith10].**

El valor máximo de manera general en más del 90% de los viajes de dichos países es inferior a los 60 kilómetros mencionados anteriormente.

En la siguiente gráfica se puede ver el resultado de un estudio realizado en EE.UU. que nuevamente corrobora los datos utilizados. Se puede ver la densidad de probabilidad de los kilómetros recorridos diariamente [O’Keefe10].

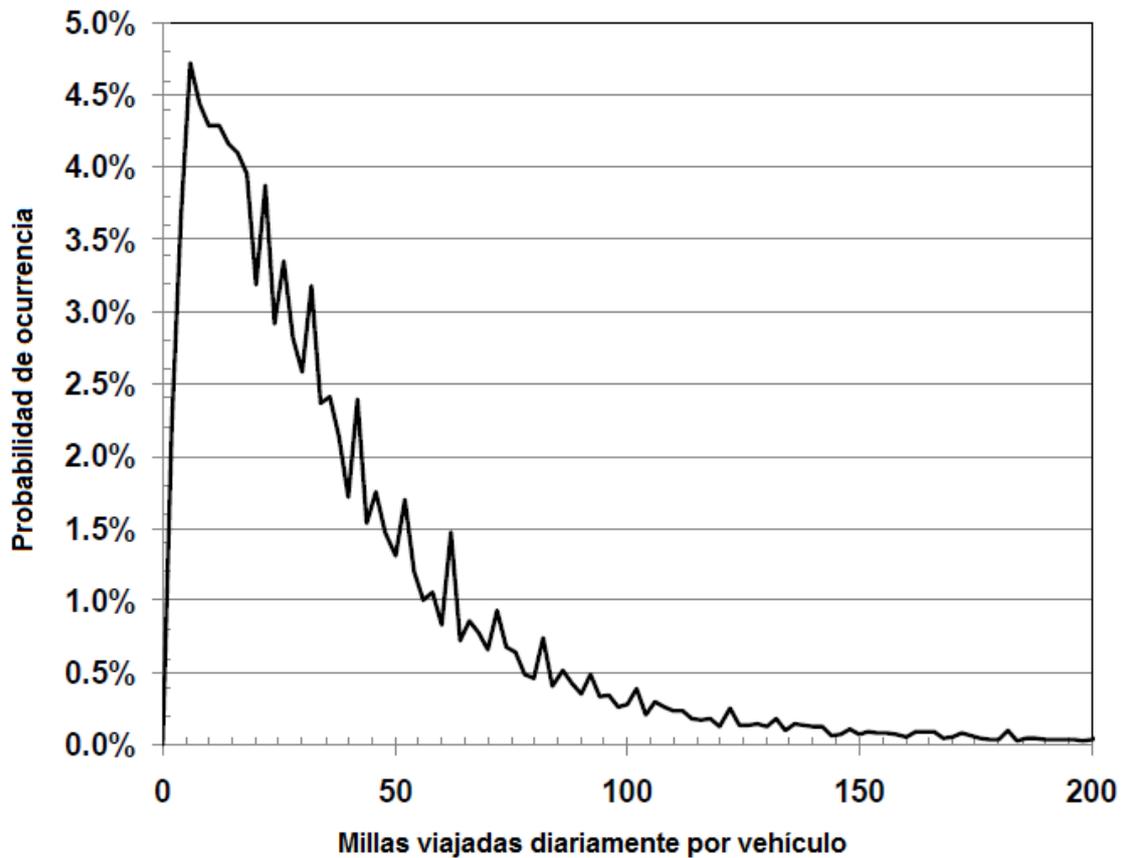


Figura 67: Probabilidad de millas recorridas por viaje en EE.UU. [O’Keefe10].

Por supuesto que este es un valor medio, pero al entrar a analizar datos más complejos, se observa que al tener en cuenta el número de conductores/vehículos que existen en una casa, incluso los valores máximos de trayectos son inferiores a 160 km [Electrification10b]. En la siguiente figura se presenta el promedio de kilómetros diarios conducidos por vehículo en los hogares que vayan desde los que el dueño posee un único vehículo hasta a aquellos que poseen seis. Incluso contando con conductores múltiples, la gran mayoría de los vehículos viajan menos de 50 kilómetros de media [Electrification10b].

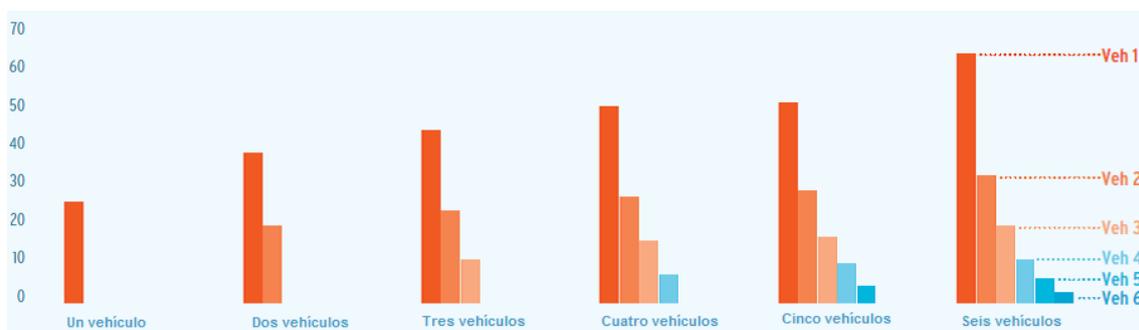


Figura 68: Kilómetros recorridos por cada vehículo en hogar [Electrification10b].

Este dato es clave, puesto que está indicando que la gran mayoría de la población podría utilizar a diario el vehículo eléctrico sin problemas, y recargarlo por la noche como se ha visto anteriormente. De ahí que se indique que el concepto de autonomía como parte del atractivo es un aspecto psicológico más que tecnológico.

Si además del valor actual se analizan estudios existentes en cuanto a la evolución de las tendencias de los transportes, se puede ver como la previsión es que las necesidades de utilización de vehículo propio son cada vez más reducido por lo que las distancias determinadas son perfectamente válidas [Anable12].

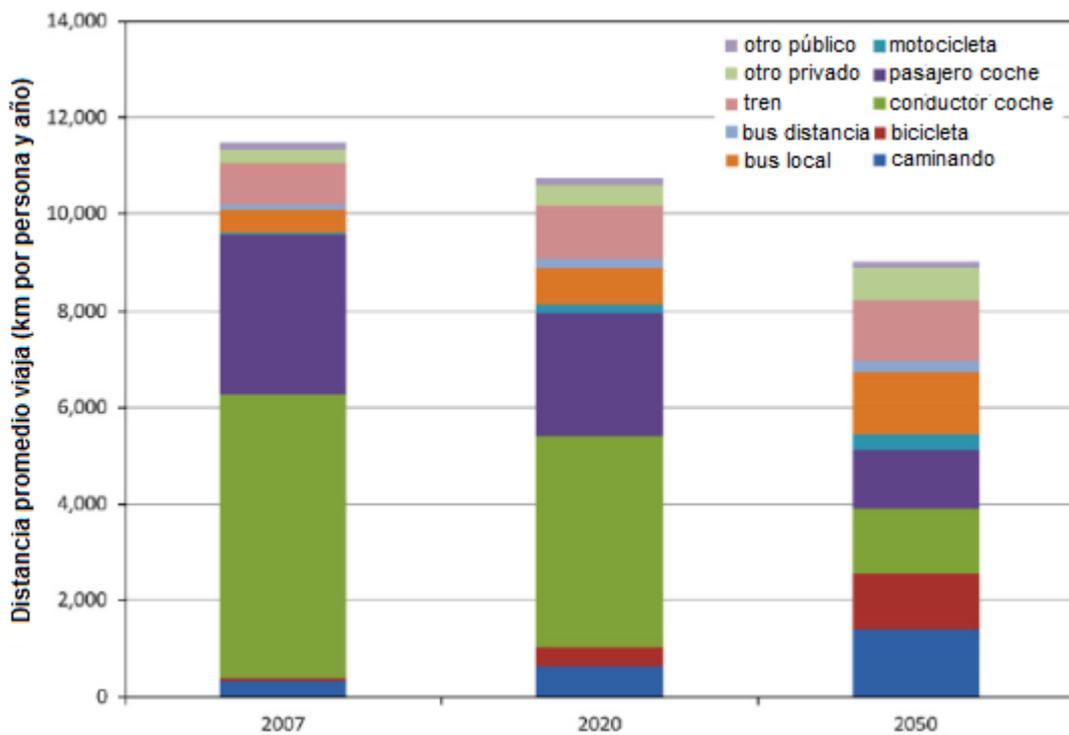


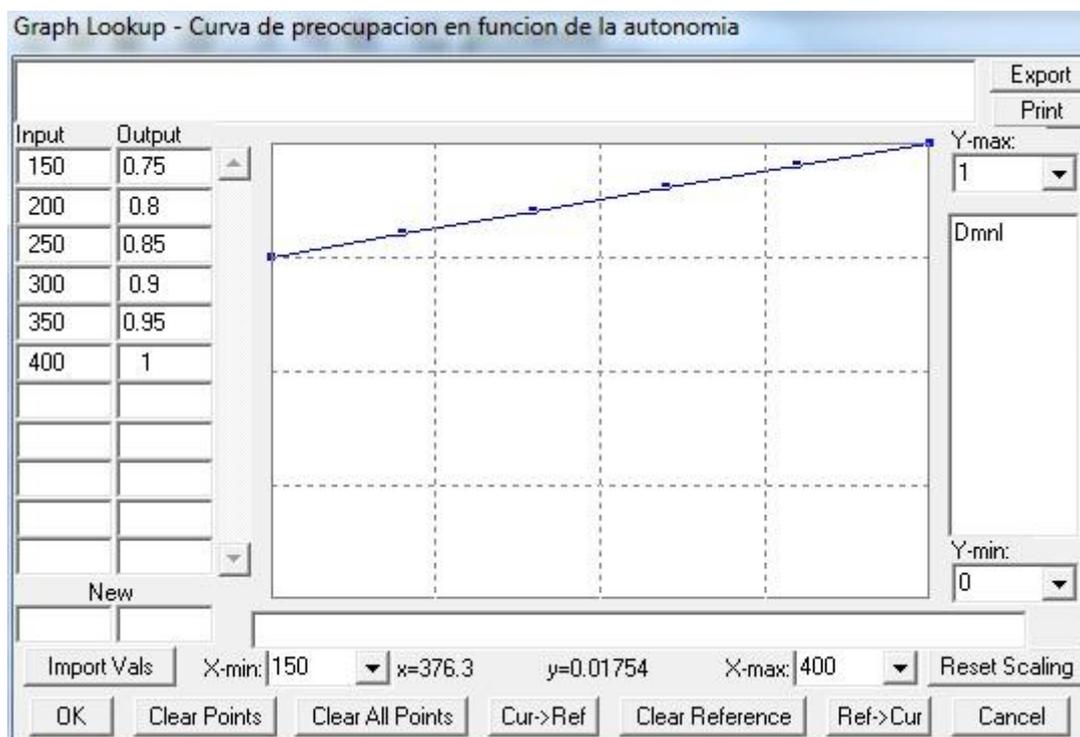
Figura 69: Kilómetros promedio que recorre una persona al año y su tipo de transporte [Anable12].

De la figura se puede destacar que se prevé una reducción de la utilización de los vehículos y los kilómetros recorridos con ellos a medida que avanza el tiempo, dando paso a sistemas alternativos como el autobús o la bicicleta. Esto atiende a que cada vez existe más población que vive en las grandes ciudades con lo que los viajes de medias distancias se reducirán considerablemente.

No obstante, y pese a estos datos, hasta que un número importante de vehículos eléctricos no se empiecen a ver circulando por las calles, y la gente le comience a perder el miedo al factor autonomía, seguirá siendo un factor clave a considerar. En la

actualidad, el dato existente derivado de las encuestas [Race] es que el 25% de los clientes potenciales, están preocupados con la autonomía de las baterías actuales.

Para ello, se ha modelado una curva que pretende representar esta preocupación.



**Figura 70: Modelo de la curva de preocupación de los clientes en función de la autonomía.**

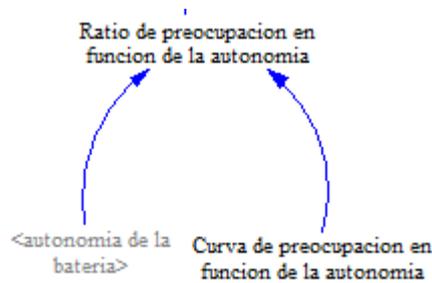
En dicha curva se trata de representar los valores conocidos, y extrapolar el resto. Se parte de la base de la autonomía actual en la que con 150 o 160 km, el 25% de la población está preocupada por la autonomía [Race], de lo que se deduce que el 75% restante no. En el otro extremo de la curva, se define el valor máximo. Con una autonomía de valores cercanos a 400 km, se considera que el 100% de la población no va a tener preocupación porque el vehículo no tenga autonomía suficiente puesto que es una autonomía similar a la del vehículo convencional. Los valores existentes entre 150 y 400 km de autonomía se han obtenido de manera lineal.

Si se cruzan los datos de la autonomía de la batería con los de la preocupación de la población por la misma, se obtendrá la variable “Ratio de preocupación en función de la autonomía” que formará parte del atractivo del vehículo eléctrico. Esta variable por lo tanto es:

*Ratio de preocupación en función de la autonomía=*

*Curva de preocupación en función de la autonomía (autonomía de la batería)*

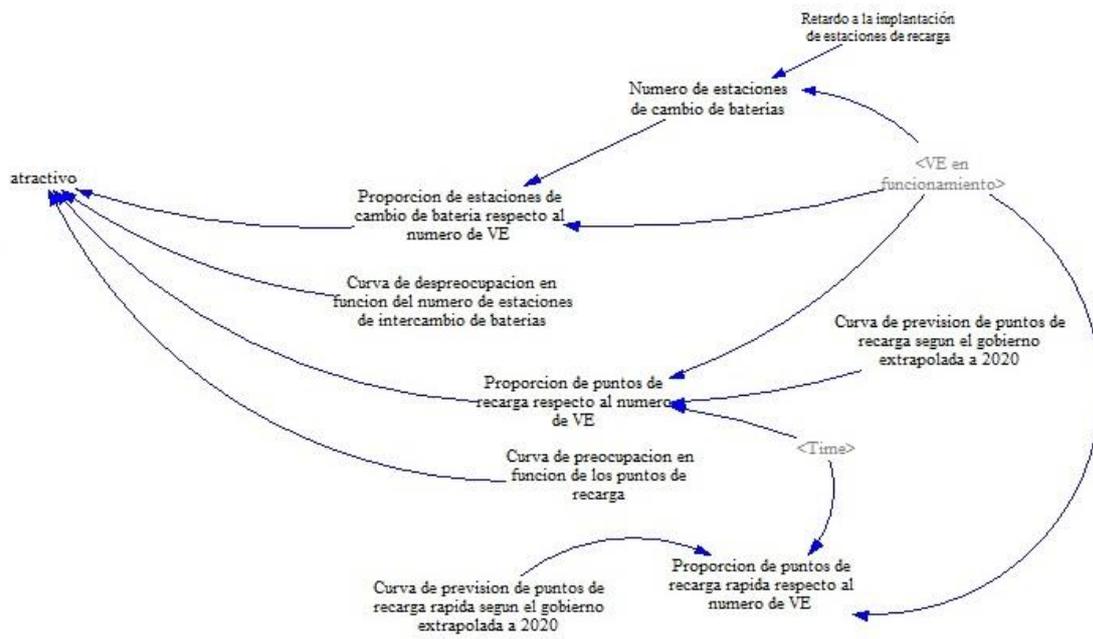
cuyo modelo se muestra a continuación



**Figura 71: Modelo de la preocupación de los consumidores por la autonomía.**

***Sub-bloque de preocupación por los puntos de recarga***

El siguiente sub-bloque corresponde con la preocupación de la población por los puntos de recarga existentes, modelado según se muestra a continuación.



**Figura 72: Modelo de la preocupación de la población por los puntos de recargas.**

La disponibilidad de una infraestructura de carga es esencial para la introducción en el mercado de vehículos eléctricos. Dicha infraestructura es necesaria para aumentar la competitividad del vehículo eléctrico frente a los vehículos convencionales. Las diferentes alternativas de carga influyen en la gama del vehículo eléctrico y los tiempos de carga, que además afectará a la cuota de mercado posible. Una alta densidad de puntos de infraestructura y rápidos tiempos de recarga requiere un menor rango máximo de autonomía.

Según esto, en este sub-bloque se van a tener en cuenta tres tipos de recarga: los puntos de recarga lenta (tanto públicos como privados), los puntos de recarga rápida, y los puntos de intercambio de baterías [Gómez12].

Obtener una estimación de los puntos de recarga que se van a instalar en los próximos años, es muy complejo e incierto. No obstante es un factor clave en el atractivo que el vehículo eléctrico vaya a tener en los clientes. Para el modelo en Dinámica de Sistemas, se ha utilizado como base la previsión que el Gobierno tiene respecto al número de puntos de carga que van a existir reflejados en la “Estrategia Integral para el Impulso del Vehículo eléctrico en España” [Industria10b]. En estos puntos de recarga previstos, se encuentran incluidos tanto los puntos de recarga de particulares en sus domicilios, como los puntos de recarga que se crearán para las flotas de vehículos, como se puede ver en la siguiente tabla:

		2010	2011	2012	2013	2014
<b>Particulares</b>	Domicilio	1.000	3.500	7.500	15.000	35.000
	Acumulado	1.000	4.500	12.000	27.000	62.000
<b>Flotas</b>	Aparcamiento Flotas	9.000	31.500	52.500	75.000	95.000
	Acumulado	9.000	40.500	93.000	168.000	263.000

**Tabla 10: Puntos de recarga previstos por el Gobierno en función de particulares y flotas [Industria10b].**

También están incluidos el número de puntos que se instalarán en vías y lugares públicos, como son centros comerciales, aparcamientos, etc.

		2010	2011	2012	2013	2014
	Centros comerciales					
	Aparcamientos públicos	150	500	1.500	3.000	7.000
<b>CARGA</b>	Aparcamientos empresas					
<b>NORMAL</b>	Acumulado	150	650	2.150	5.150	12.150
	Vía pública	100	350	750	1.500	3.500
	Acumulado	100	450	1.200	2.700	6.200
<b>CARGA</b>			10	20	40	90
<b>RÁPIDA</b>	Acumulado		10	30	70	160

**Tabla 11: Puntos de recarga previstos por el Gobierno en función del tipo de carga [Industria10b].**

La previsión realizada por el Gobierno, contempla que en centros comerciales y aparcamientos públicos y de empresas exista 1 punto de carga para cada 5 vehículos particulares y uno por cada 10 en la vía pública [Industria10b].

A continuación se va a analizar el caso de la recarga lenta. Este tipo de recarga dura entre 4 y 8 horas (dependiendo del tamaño de la batería a cargar) y sólo es necesario un enchufe de 230 V y 16 A (corresponde con la potencia media de una casa). Utiliza una toma de corriente normalizada pero no exclusiva para los vehículos eléctricos. La previsión actual sólo existe hasta el 2014, por lo que los valores hasta 2020 se han extrapolado a partir de estos datos con una tendencia bastante más lineal que la existía hasta el 2014 puesto que se tratan de los años de la gran implantación, obteniendo la curva que se muestra a continuación.

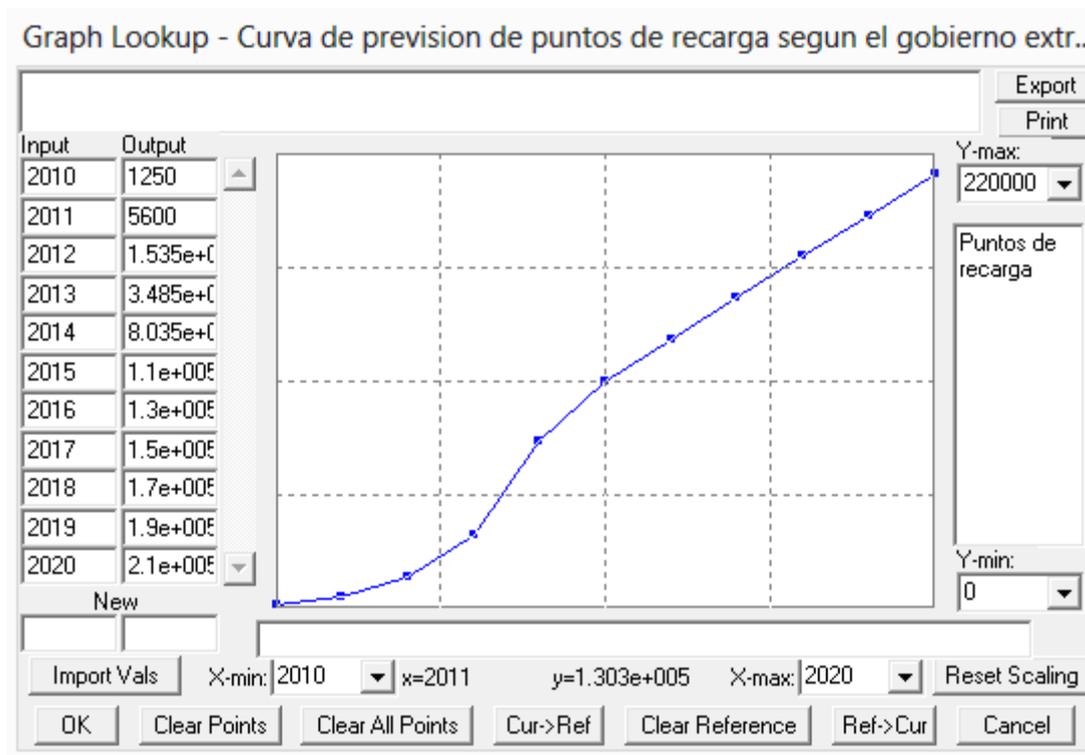


Figura 73: Modelo de la curva de previsión de puntos de recarga según el Gobierno [Industria10b].

Para la realización de esta curva no se han contemplado los puntos de recarga que se habían estimado para flotas puesto que estos no van a afectar al posible consumidor final ya que no podrá tener acceso a ellos en ningún caso. Al constatar las previsiones realizadas con el dato de puntos de carga implantados en la península ibérica al inicio del año 2013 en vías públicas y centros comerciales que es de algo más de 6.000 puntos, se puede ver que la previsión que se realizó en su momento para cargadores en vías públicas no estaba mal calculada por lo que se han aceptado los valores estimados como buenos.

A partir del año 2014 al no poseer datos, se ha tenido que estimar. La forma de la gráfica se ha mantenido lineal y no exponencial como era hasta ese momento puesto que se considera que durante los primeros años de la implantación de puntos de recarga será necesaria una mayor inversión en dichos puntos para dotar al sistema de los puntos mínimos mientras que posteriormente sólo habrá que ir adecuando el sistema de puntos de recarga a las necesidades que se vayan generando pero sin la necesidad urgente de crear una red de puntos como en los primeros años.

En cuanto a la recarga rápida, se está hablando de una potencia de recarga de 22 kW (440 V y 32 A). Estos puntos de recarga se utilizarán normalmente en grandes casas, oficinas y empresas. De acuerdo con las especificaciones del tiempo de recarga del Nissan Leaf, este tiempo puede ser reducido a aproximadamente 1 hora [Bongard11] y su precio no es demasiado elevado, estando alrededor de los 2.000 €. Para este tipo de carga, se necesita conectar el vehículo eléctrico a una base de toma de corriente normalizada, mediante un cable especial que cuente con un conductor piloto de control y un sistema de protección diferencial (cuyo costo fue incluido en el bloque de coste del vehículo eléctrico). Aquí existe otra problemática añadida y es el tipo de conector. Respecto a esto, existen dos claros grupos de conectores del lado de las infraestructuras: EV Plug Alliance o Mennekes. A estas alturas de la comercialización del vehículo eléctrico ya se debería haber fijado un estándar, pero no ha sido así. La ACEA (Asociación de Constructores Europeos de Automóviles) ha fijado el año 2017 como fecha límite para fijar el estándar.

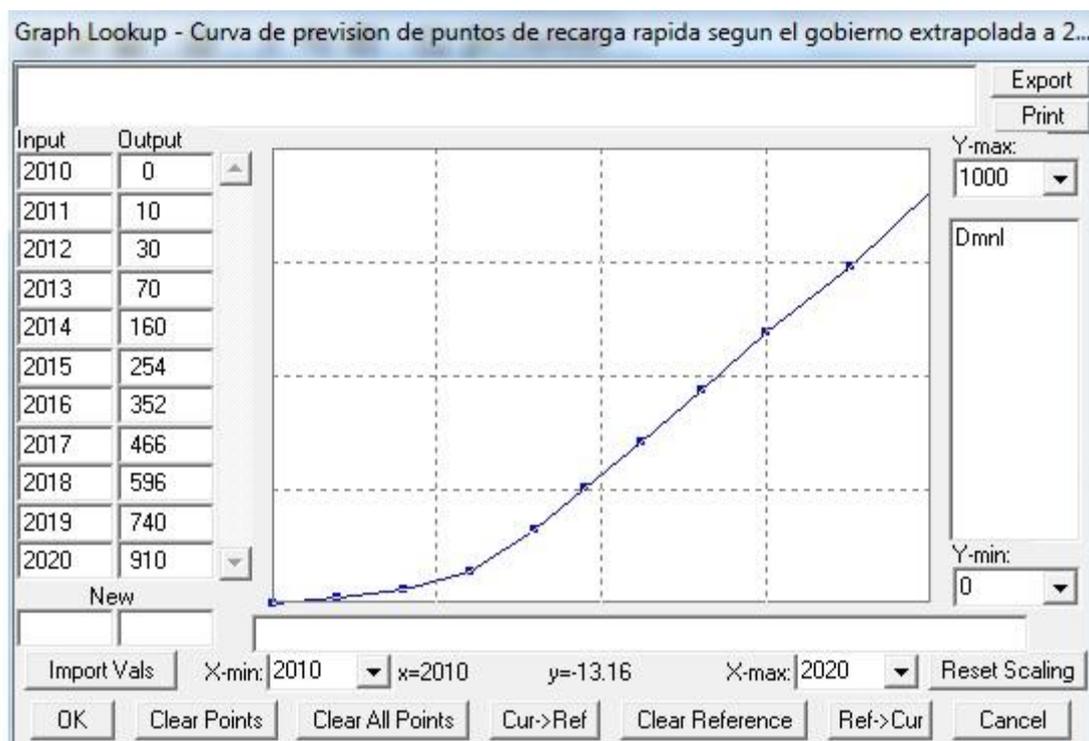
Además de los dos tipos de posibles recargas comentados, existe otro tipo denominado estación de carga rápida. Este tipo de recarga tiene la opción de recargar entre 50 kW y 250 kW (400-600V y 125 A en corriente continua). El tiempo de carga es inferior a los anteriores, hablándose de tiempos incluso inferiores a 20 minutos, [Bongard11]. Sin embargo también tiene algunas desventajas, ya que estas estaciones de recarga son muy grandes (y muy caras, con valores próximos a los 55.000 € [Schroeder12]).

Además, esto hace que sea complicado recargar el vehículo eléctrico en el propio hogar del propietario. Otro problema es el máximo del 80% que una batería puede ser recargada con una estación de recarga rápida, puesto que la recarga puede dañar la batería en gran medida, resintiendo mucho el tiempo de vida de la batería.

No obstante, y sea como fuere, el incentivar y promover las recargas rápidas, lejos de convertir al vehículo eléctrico en una herramienta eficaz capaz de “aplanar” las fuertes variaciones en la curva de demanda eléctrica y dar salida al excedente de electricidad nocturna, como se ha visto anteriormente, implicará un mayor consumo en las horas punta, para el cual no está claro que el sistema eléctrico actual pueda estar preparado.

Es muy probable que este problema en cuanto a la recarga rápida, sea el principal factor que está implicando que el Gobierno no esté apostando fuertemente por este tipo de recarga. Si se analiza la estimación del Gobierno, para el año 2014 en toda España solamente se prevén 160 puntos de recarga rápida.

En el modelo de Dinámica de Sistemas, se ha incluido una curva previsual del número de puntos de recarga rápida que van a existir tomando como base la previsión del Gobierno hasta el 2014, y extrapolándola hasta el 2020.



**Figura 74: Modelo de la curva de previsión de puntos de recarga rápida según el Gobierno [Industria10b].**

Partiendo de la baja cantidad de puntos de recarga rápida que previsualmente van a existir, la proporción con respecto al número de vehículos en circulación, va a ser muy baja. Realizando diversas simulaciones se determina que dicha proporción tiende a cero (en el 2014 el Gobierno prevé 252.000 vehículos eléctricos para 160 puntos de recarga rápida [Industria10b]), y teniendo en cuenta que será necesario alrededor de 30 minutos para completar la carga no parece un sistema muy viable con este número de puntos. Como ejemplo un simple cálculo, con 160 puntos de recarga rápida, se podrían cargar al día como máximo 1.920 vehículos, lo que implicaría que serían necesarios 131 días completos para poder cargar todos los vehículos eléctricos existentes.

Según esto, no se contempla dentro del atractivo del vehículo eléctrico el concepto de recarga rápida como tal, ya que no estará al acceso de todos los usuarios. Lo único que se ha modelado es un ratio con respecto al número de vehículos eléctricos existentes para poder observar la evolución.

La curva de previsión de puntos de carga, debe cruzarse con la preocupación de los consumidores por este número de puntos de carga, pero la pregunta es: ¿cómo determinar el mínimo número de puntos de carga para satisfacer las necesidades?

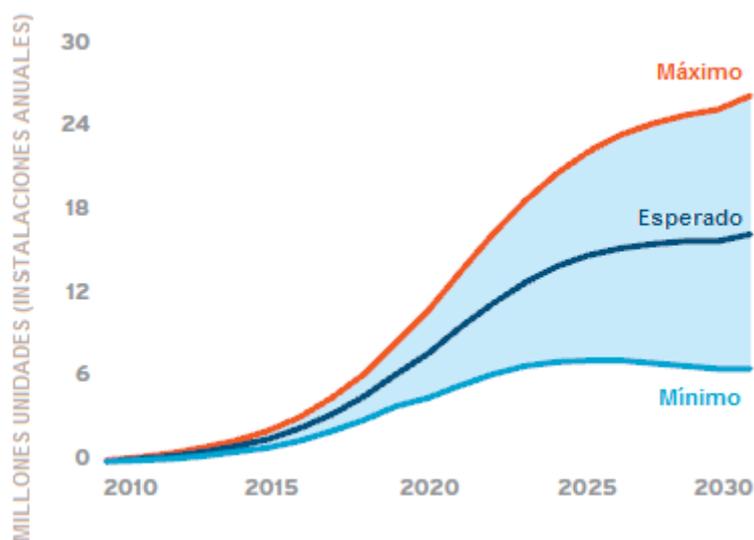
La respuesta viene dada por los ratios de puntos de carga frente al número de vehículos eléctricos en funcionamiento. Un estudio realizado por TEPCO (*The Tokyo Electric Power Company*) [Electrification09] demuestra que contra más infraestructura pública de recarga existe, realmente menos se utiliza. TEPCO poseía una flota de vehículos eléctricos y estaciones de carga localizadas en su mayoría en la sede de la flota en la compañía. Se comprobó que estos vehículos eléctricos, retornaban al depósito con niveles de carga muy elevados, frecuentemente superiores al 50 %.

TEPCO instaló entonces una red de cargadores rápidos por toda la ciudad. Los resultados fueron sorprendentes: en vez de utilizar los cargadores públicos para continuar cargando sus baterías, simplemente el hecho de conocer que esos puestos existían hizo que los conductores se sintieran más cómodos con sus vehículos y redujeron su ansiedad respecto a la autonomía. Los coches eléctricos de la flota comenzaron a retornar al depósito con niveles de carga muy bajos. Este aspecto psicológico es corroborado en otros estudios en los que se concluye que a menor rango de autonomía, implica más proceso de recarga y la infraestructura de aprovisionamiento de combustible parece ser incluso inferior desde el punto de vista del consumidor final [Walther10].

El ejercicio realizado por TEPCO demuestra un importante factor a tener en cuenta [Electrification09]. Para los vehículos eléctricos es asumido por todo el mundo que será necesaria una red de cargadores públicos importante para satisfacer las demandas de recarga del consumidor. La red debería ser diseñada para asegurar el rango de autonomía de la batería y hacer que los consumidores se sientan más cómodos. Sin embargo, a medida que la confianza de los consumidores crezca, es muy probable que los ratios de utilización de los cargadores, sean más bajos de lo esperado. Teniendo

en cuenta el coste de las unidades de carga, será muy importante pensar cuidadosamente el mejor modo de desarrollar la infraestructura y en qué cantidad.

En la siguiente figura se puede observar los cargadores públicos necesarios previstos para las próximas décadas [Electrification09], donde se muestran los tres escenarios analizados, el esperado, el mínimo y el máximo



**Figura 75: Previsión de cargadores públicos necesarios según los tres escenarios analizados [Electrification09].**

Estos mismos valores puestos en forma de ratios son los siguientes

	2010	2020	2030
<b>Cargadores públicos esperados por vehículo</b>	2.0	1.5	1.0
<b>Cargadores públicos máximos por vehículo</b>	2.5	2.0	1.5
<b>Cargadores públicos mínimos por vehículo</b>	1.5	1.0	0.5

**Tabla 12: Ratios de cargadores necesarios en los diferentes escenarios [Electrification09].**

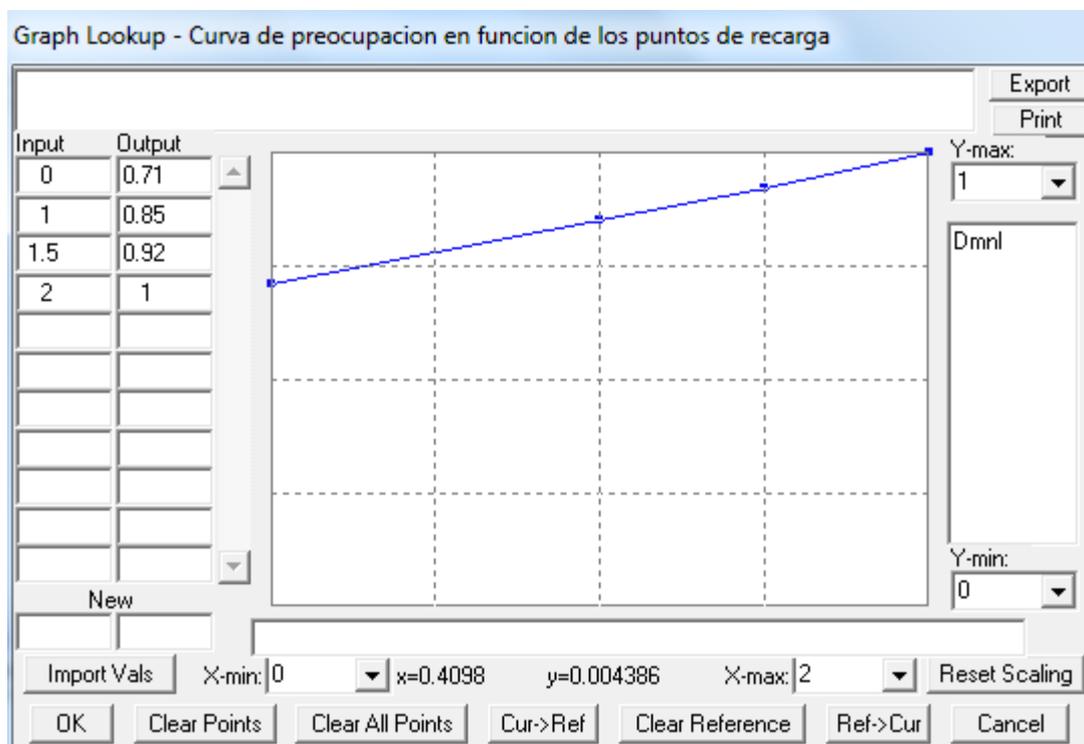
Para el año límite de este estudio que es el 2020 los ratios necesarios serán entre 1 y 2 cargadores por cada vehículo [Electrification09]. Si se cumplen que el ratio de cargadores por vehículo se encuentra en estos límites, la infraestructura será correcta. Si el valor del ratio es superior, la infraestructura será correcta también, pero estará sobredimensionada, lo que implicará un sobrecoste innecesario. Si por el contrario, el ratio es inferior a 1, serían necesarios más cargadores.

El valor del ratio viene determinado al dividir el número de puntos de recarga existentes en el año en concreto, con el número de vehículos en funcionamiento, valor que se almacena en la variable

*Proporción de puntos de recarga respecto al número de VE=*

*IF THEN ELSE(VE en funcionamiento>0,Curva de previsión de puntos de recarga según el Gobierno extrapolada a 2020(Time)/VE en funcionamiento,0)*

Una vez calculado el ratio, será necesario cruzarlo con una curva que refleja la preocupación de los ciudadanos en cuanto al número de cargadores se refiere.



**Figura 76: Modelo de la curva de preocupación de los ciudadanos por el número de cargadores.**

Para modelarla, se ha tenido en cuenta que el 29% de los encuestados ve como principal inconveniente la falta de puntos de carga [Race]. De ahí se toma el valor inicial de 0,71 para un ratio de 0 que es aproximadamente el actual. Por contra, si el valor del ratio es de 2, o superior, el número de cargadores existentes será el suficiente para satisfacer las necesidades, por lo que no existirá preocupación. Los valores intermedios entre ambos extremos están extrapolados de manera lineal.

El último sistema de carga de baterías tenido en cuenta es el de la sustitución de la batería completamente una vez que se ha descargado [Andersen09]. Este sistema está encabezado por la compañía “Better Place” [Better]. Su modelo se basa en la creación de una red de servicios de transporte para el apoyo de los vehículos eléctricos, pero su principal aportación al sector es las estaciones de intercambio de baterías. De esta manera el vehículo eléctrico podría equipararse al vehículo convencional en cuanto a prestaciones de autonomía y tiempos de carga. Better Place se centra en el desarrollo de una red abierta capaz de servir a todos los conductores del vehículo eléctrico según sus propias palabras.

El proyecto Better Place, ha sido iniciado en Israel, donde se pretenden ubicar 500.000 puntos de recarga.

Según las previsiones el tiempo de cambio estimado para este sistema de intercambio de baterías es de 3 minutos (aunque la propia Better Place anuncia tiempos de 80 segundos) [Better], lo que lo haría muy competitivo frente a las gasolineras existentes en la actualidad.

Sin embargo, existe una clara desventaja de este sistema y es la falta de estandarización de los modelos eléctricos de los diferentes fabricantes que implican que tienen diferentes configuraciones del bajo piso de los vehículos, y por tanto diferentes ubicaciones del motor, batería, etc [DeLuchi89], [Christensen12]. Esto dificulta enormemente a día de hoy el poder utilizar este sistema con todos los vehículos eléctricos. Mientras no se implante una regulación y una estandarización, no surgirá como un área de servicio ligado al vehículo eléctrico. Esta estandarización requiere la cooperación entre los fabricantes de los vehículos eléctricos y los fabricantes de las baterías pero parece poco probable hoy en día [Järvinen12].

No obstante, tal y como Better Place [Better] afirma, están trabajando de manera muy próxima con los fabricantes de vehículos eléctricos para asegurar que los vehículos y las estaciones de intercambio de baterías sean compatibles, así como con el consorcio EasyBat. De hecho, el principal acuerdo que tiene Better Place es con Renault puesto que estos últimos han diseñado el Renault Fluence (el modelo que se ha utilizado como base de la tesis) de manera que pueda utilizar este sistema. Esta metodología

también ha sido adoptada por Mia Electric y Daimler Europa y se espera que comience a extenderse a la zona pacífica de Asia y América del Norte a finales de 2013 [Pike12].

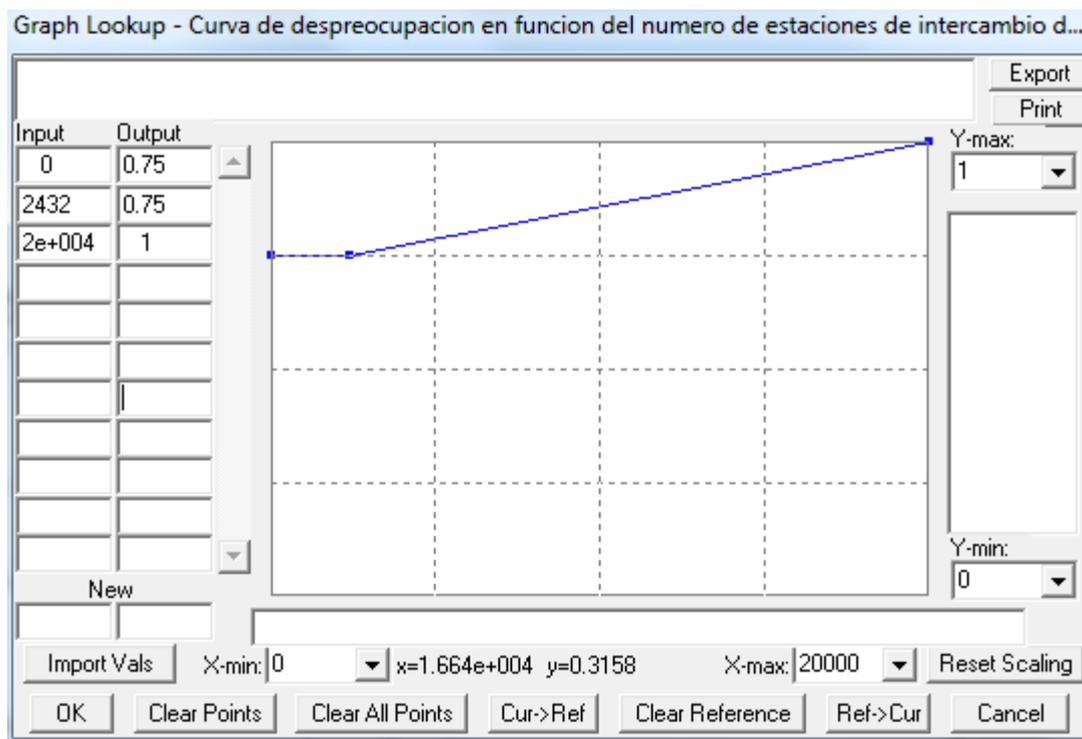
La red de Better Place de puntos de carga se basa en normas nacionales e internacionales y ofrecen una carga segura, confiable y conveniente. La industria está progresando rápidamente para normalizar la carga conectores para diferentes ubicaciones y usos. Better Place está participando activamente en estas discusiones de normalización en los organismos internacionales como la ISO y la IEC. Los dos principales candidatos actuales para la conexión estándar de punto de carga son J1772 (EE.UU.) y IEC 62196/Mennekes (Europa).

La inclusión del intercambio de baterías en el modelo, es relativamente compleja, puesto que no existen demasiados datos en España, pero lo que sí que se puede determinar es que la existencia de este tipo estaciones va a influir de manera muy positiva en el atractivo de los vehículos eléctricos para los consumidores, principalmente incluyendo un factor psicológico positivo en el consumidor, ya que su hábito de adquisición de combustible no variará.

Para modelar este método de carga, se ha utilizado una comparación con las gasolineras actuales:

En España actualmente existen 9.046 gasolineras (una cada 18 kilómetros de carreteras en media) [Mityc] para un parque de vehículos aproximado de 22.000.000 [Anfac12]. Al dividir ambos valores, se puede determinar que de media existe una gasolinera para cada 2.432 vehículos. Este es el valor real que se ha tomado como base para el cálculo de las estaciones de intercambio necesarias, puesto que el tiempo de utilización de las mismas es similar al de las gasolineras convencionales.

Estos valores se han utilizado para modelar la pérdida de preocupación que el conductor va a tener debido a la despreocupación por la autonomía, es decir, la influencia psicológica que dichas estaciones de intercambio van a ejercer. Si existieran tantas estaciones de intercambio de baterías como gasolineras, no existiría la preocupación por la autonomía actual. Según esto, se ha modelado una curva con estos valores:



**Figura 77: Modelo de la curva de despreocupación por la existencia de estaciones.**

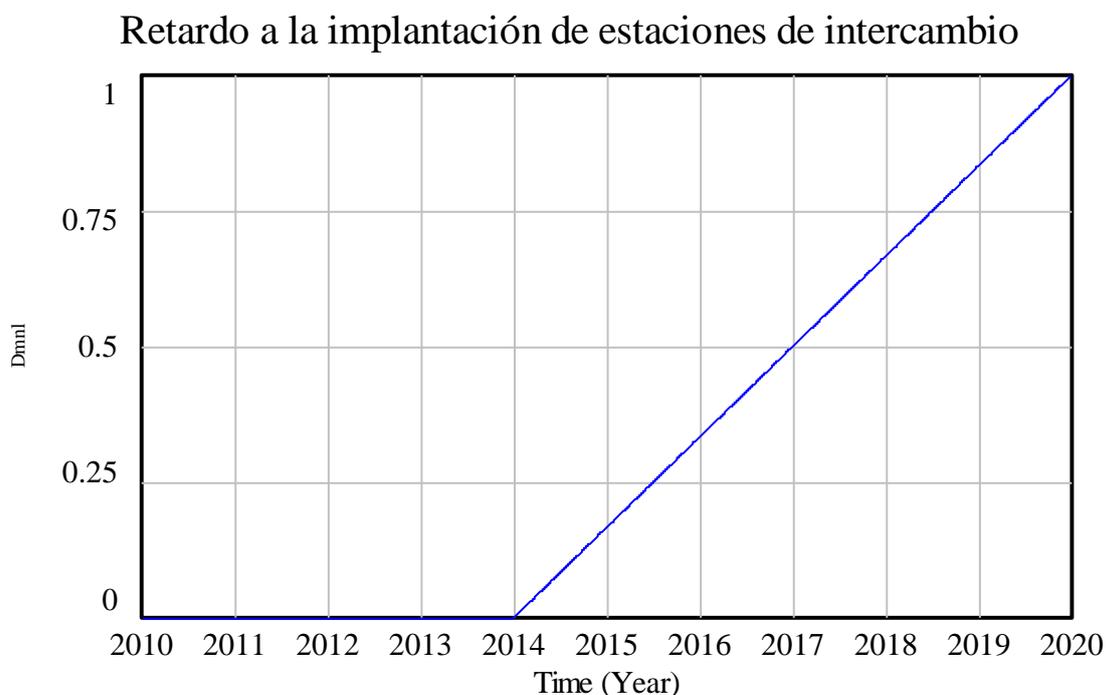
El efecto de esta curva es el inverso a la curva de preocupación por la autonomía, es decir, en la fórmula del atractivo, este valor irá dividiendo a la preocupación de la autonomía, para contrarrestarla.

La entrada de esta curva será el ratio existente entre el número de vehículos eléctricos y el número de estaciones de cambio de batería. Si por cada estación existen pocos vehículos, quiere decir que existirá un buen sistema de intercambios, mientras que si la proporción es muy elevada, indicará que existirán muy pocas estaciones. El punto de inflexión está determinado por el valor 2.432 que es el calculado para los vehículos convencionales. En el caso de que el ratio sea inferior a 2.432, se puede asumir que el gran número de estaciones de cambio, contrarresta completamente el efecto de la preocupación por la autonomía, mientras que si el ratio es superior, la preocupación se verá reducida, pero no por completo, por lo que se obtendrá un valor proporcional al ratio (la segunda parte de la curva) que comenzará en 0,75 que es el valor de preocupación de la población por la autonomía.

Inicialmente, el valor de estaciones de cambio de baterías en España será igual a 0, puesto que no existe ninguna, y existen serias dudas de cuando van a comenzar a

crearse puesto que, a diferencia de la mayoría de los países europeos, España aún no ha comenzado a explorar esta vía.

No obstante parece claro que antes o después comenzarán a surgir este tipo de estaciones (o al menos proyectos de creación) si se desea una buena implantación del vehículo eléctrico, por lo que también se modela. Para ello, se introduce un retardo a la implantación debido a la falta de iniciativa actual. Se estima que a medida que comiencen a circular vehículos eléctricos a partir de 2012 comenzará el interés creciente pero a la no existir previsión alguna, no se puede determinar cuándo comenzarán a instalarse estas primeras estaciones. Se ha tomado como suposición de partida el año 2014 para el comienzo de los primeros desarrollos de estaciones en España, con una pendiente poco pronunciada hasta el año 2020.



**Figura 78: Retardo a la implantación de estaciones de intercambio de baterías.**

Como base se ha tomado Dinamarca, puesto que es un país que sí que está apostando claramente por este sistema [Christensen12]. De hecho, su objetivo es la eliminación de los combustibles fósiles para el año 2050. La previsión de cara a 2012 de Better Place en Dinamarca es de implantar 20 estaciones operativas. Según esto, en Dinamarca será posible recorrer el país de una punta a otra sin utilizar un combustible fósil debido a la amplia red de electrolinerías implantadas con una distancia de máxima

de 65 kilómetros de separación entre ellas, tal y como se puede ver en la siguiente figura.



**Figura 79: Previsión de red de electrolineras en Dinamarca [Better].**

La pretensión de Better Place en este país es instalar casi 1.000 estaciones de intercambio para lograr la cobertura de todo el mercado potencial [Wdi10]. No obstante, a mediados del año 2012, Better Place ha tenido que solicitar una ayuda económica de 40 millones de euros al European Investment Bank (EIB) para poder proseguir con su plan de instalación de estaciones puesto que los resultados económicos no están acompañando.

El caso de Israel es incluso más llamativo, ya que actualmente ya tienen 40 electrolineras funcionando, cifra que prácticamente se considera suficiente para cubrir las necesidades.

Según estudios daneses [Eskebaek09], en los diversos escenarios contemplados, se prevé una tasa de aproximadamente un 0,02% de estaciones de intercambio por cada vehículo eléctrico circulando por las carreteras danesas, es decir, existirá una estación de intercambio de baterías por cada 5.000 vehículos eléctricos.

Según estos datos, se ha modelado que el número de estaciones sea proporcional al número de vehículos eléctricos en funcionamiento, con el retardo anteriormente mencionado.

*Número de estaciones de cambio de baterías=*

*Retardo a la implantación de estaciones de recarga\*(VE en funcionamiento\*0.0002)*

Este dato será el utilizado para calcular la proporción de estaciones respecto al número de vehículos eléctricos.

### ***Sub-bloque del Boca a boca***

El siguiente sub-bloque a modelar corresponde con el atractivo que se vaya a generar por el boca a boca entre los consumidores iniciales. En la adaptación de cualquier nueva tecnología o producto, es muy importante la imagen que se transmita del mismo. Por ello, el boca a boca va a ser un factor vital en la implantación del vehículo eléctrico. Es muy común que un comprador potencial de un vehículo eléctrico, previamente a su compra, intente establecer contacto con algún usuario actual y demandarle información y críticas.

Cuando un nuevo producto se introduce, por lo general, se realiza una gran campaña de marketing que muestra a la gente el nuevo producto y entonces la exposición social comienza como se verá en el siguiente sub-bloque. Una vez que la gente comienza a usar el producto, ellos exponen el producto a otras personas por medio del boca a boca, y cuanto mayor sea la cantidad de personas que utilizan el nuevo producto, mayor será la exposición social. En el caso del estudio, cuanto mayor es el porcentaje de usuarios de vehículos eléctricos, mayor es la propagación del conocimiento por el boca a boca del nuevo producto lo que refuerza el bucle.

Básicamente lo que se pretende modelar con este sub-bloque es la necesidad del consumidor de que le hablen bien del producto nuevo, para que él mismo se convenza pese a la cantidad de información técnica que pueda conocer.

El modelo es el siguiente

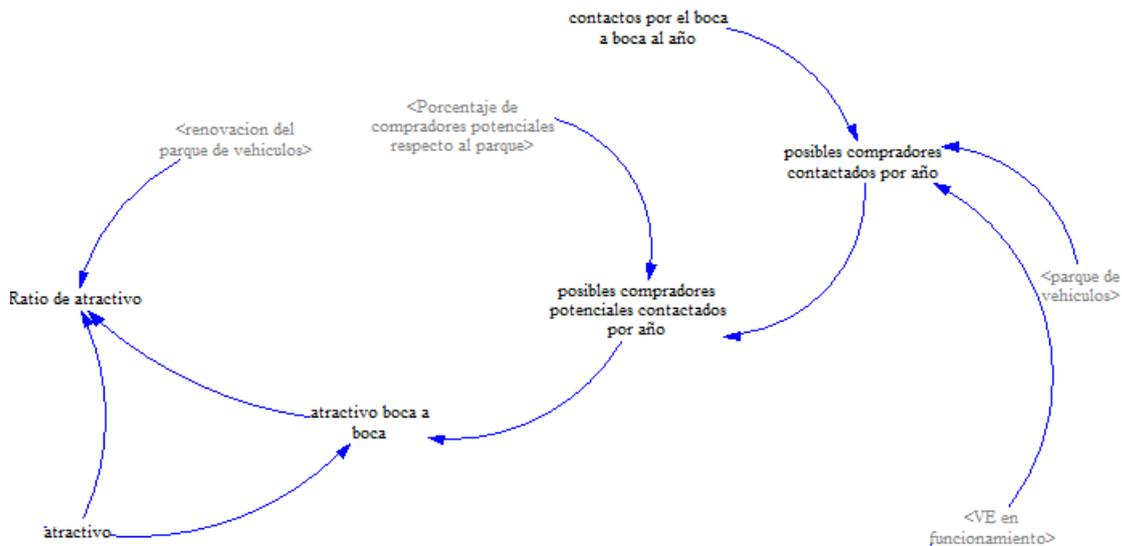


Figura 80: Modelo del atractivo del boca a boca.

Muchos economistas aseguran que el boca a boca es el mejor modo de propagar la conciencia de un sector rentable.

Se asume que cada usuario activo del vehículo eléctrico, tiene contacto con dos potenciales compradores de vehículo eléctrico al año [Movilla09]. El hecho de tener contacto con dos potenciales compradores no implica que cada uno de ellos vaya a adquirir un vehículo eléctrico.

$$\text{contactos por el boca a boca al año} = 2$$

El porcentaje de posibles compradores contactados por año corresponderá con el porcentaje de usuario del vehículo eléctrico respecto al parque automovilístico, multiplicado por el número de contactos por año.

*posibles compradores contactados por año=*

*VE en funcionamiento\*contactos por el boca a boca al año/parque de vehículos*

Como se ha comentado antes, no todos los contactos realizados van a acabar en la compra de un vehículo eléctrico, por lo que se modela una nueva variable que incluya esto:

*posibles compradores potenciales contactados por año=*

*Porcentaje de compradores potenciales respecto al parque \* posibles compradores contactados por año*

Para ello se multiplica la variable que contiene todos los contactos realizados al año por el porcentaje de compradores potenciales respecto al parque (variable que se comentará en el bloque de la demanda) por las propias características limitadoras del vehículo eléctrico como es la autonomía y disponibilidad de garaje.

Los contactos sólo son tenidos en cuenta entre un usuario actual y un posible comprador real. Los contactos entre dos usuarios no se tienen en cuenta al no ser de utilidad.

Por último, se calcula el ratio del atractivo del boca a boca que vendrá determinado por estos contactos realizados, y el atractivo que se haya generado en ellos por las características actuales del vehículo eléctrico.

Para ello, se multiplica el porcentaje de compradores potenciales contactados por el atractivo del vehículo eléctrico (variable que se está calculando con todos los términos de los diversos sub-bloques y que se verá a continuación).

*atractivo boca a boca=*

*posibles compradores potenciales contactados por año\*atractivo*

Con esto se consigue modelar lo anteriormente descrito: de todos los compradores susceptibles contactados, sólo una fracción determinada llegarán a adquirir

el vehículo. Lógicamente, cuanto mayor sea el atractivo del vehículo eléctrico, mayor serán las posibilidades de “convencer” al cliente potencial.

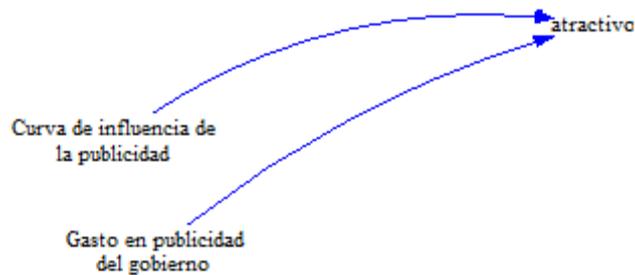
### ***Sub-bloque de Publicidad***

En este sub-bloque, se ha pretendido modelar la cantidad de información que el cliente potencial posee. Por todos es conocido que en la sociedad actual, la publicidad es un factor clave en el lanzamiento y éxito de cualquier producto. En el caso del vehículo eléctrico no es distinto, máxime cuando es una nueva tecnología respecto a la cual el cliente tiene reservas por sus teóricas pérdidas de prestación frente al vehículo convencional.

Si la intensidad de comercialización durante los primeros períodos de la difusión del nuevo producto o tecnología no es suficiente para lograr que el producto se pueda auto-sostener debido a una popularidad suficiente (manteniendo una alta exposición social), la difusión fallará a pesar del éxito. Hay muchos ejemplos donde han ocurrido estos efectos llevando al fracaso al producto. Por ejemplo, la difusión de los vehículos diesel ha sido un éxito en varios países europeos, pero la difusión ha fallado en EE.UU. y algunos países de América del Sur [Struben08]. Se pueden observar casos similares en los vehículos de gas natural comprimido, que han tenido éxito en algunos países, como Argentina, y fracaso en otros como Canadá y Nueva Zelanda, a pesar de una intensa campaña de marketing y comercialización [Struben06b]. Estos ejemplos muestran que algunos productos tecnológicamente prometedores con precios competitivos han encontrado una fuerte resistencia social. J. Struben [Struben06a] analiza con más detalle la razón de los fallos de marketing teniendo en cuenta complejas interacciones sociales y la propagación del conocimiento.

Es necesario resaltar que no es objetivo de este estudio el analizar cuánto marketing es necesario para garantizar el éxito. Por lo tanto, se considera que el marketing suministrado puede conseguir suficiente éxito para comenzar la nueva tecnología.

El modelo es el siguiente

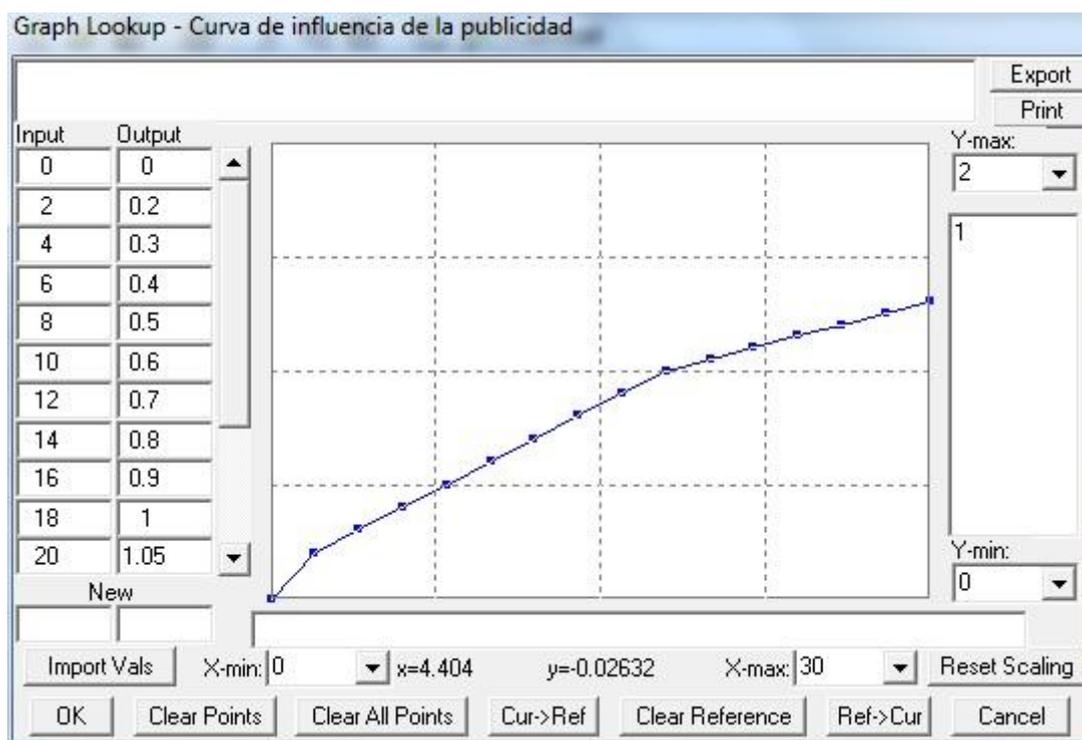


**Figura 81: Modelo de la influencia de la publicidad.**

Según el estudio de RACE anteriormente comentado [Race], el 90% de los españoles considera que la información que existe en la actualidad acerca de las características y particularidades del vehículo eléctrico es escasa, confusa o nula. Esto es un factor claramente determinante.

Es cierto que actualmente el Gobierno ha gastado “poco” dinero en publicitar el vehículo eléctrico. En el proyecto Movele están claramente definidas las subvenciones a la compra del vehículo eléctrico y a la implantación de puntos de recarga, pero no hay nada determinado acerca de la publicidad del vehículo eléctrico. De hecho, dentro del Plan de Publicidad y Comunicación Institucional 2010 [Presidencia10] no existió ni una sola campaña dedicada a este efecto. También es cierto que, a medida que los diversos fabricantes vayan comercializando sus propios vehículos eléctricos, ellos mismos invertirán en publicidad, pero en la actualidad esto todavía no existe.

Para representar la relación entre publicidad y el público, no se tiene en cuenta la calidad de la publicidad debido a su complejidad, y subjetividad. Se trata de relacionar el dinero invertido en publicidad con el grado de influencia que va a tener en el consumidor, para lo cual se utiliza la siguiente curva



**Figura 82: Curva de la influencia de la publicidad en función del gasto.**

Al introducir los millones de euros que se gasta en publicidad se obtiene el valor de la influencia. Para realizar esta curva, se han utilizado los valores económicos existentes, en los que se indica que una gran multinacional como Renault se gasta alrededor de 20 millones de euros en publicitar su imagen [Faconauto] siendo la que más rentabilidad obtiene de la misma.

Según esto, se toma como dato óptimo 18 millones de euros. Esto significa que al invertir esta cifra, no se van a perder clientes potenciales por la publicidad. A medida que la inversión sea superior, se obtiene un efecto de influencia superior, es decir, hay consumidores que no tenían pensado comprar cierto artículo y a causa de la gran cantidad de publicidad, terminan adquiriéndolo. Para valores inferiores a 18 millones, se considera que hay una parte del total de la clientela potencial que no se verá influida por esta publicidad, valor que aumentará a medida que descienda la inversión en publicidad. Obviamente este dato es muy subjetivo ya que depende de la opinión de las personas y no todos piensan de igual manera.

Con esta gráfica se debe cruzar el valor de la inversión en publicidad del vehículo eléctrico que va a realizar el Gobierno. Para este estudio se ha tomado como

dato base la cifra de 2 millones de euros como inversión en publicitar el vehículo eléctrico [Movele].

Este dato se ha obtenido del Plan de Acción 2010-2012 recogido dentro de la Estrategia para el Impulso del Vehículo eléctrico [Industria10b]. En dicho plan se recogen acciones de marketing estratégico y comunicación institucional: Identificación de las barreras de hábitos y opinión que presenta el vehículo eléctrico, definición y realización de un plan de marketing para superar estas barreras con un coste estimado de 2 millones de euros.

Si se compara con los gastos del Gobierno en publicidad en los últimos años, en el año 2009 [Presidencia10], son coherentes ya que sólo hay tres campañas que han superado los 8 millones de euros: la de seguridad vial, de la Dirección General de Tráfico, la de proximidad de las Fuerzas Armadas y apoyo al reclutamiento, del Ministerio de Defensa, y la de ahorro de energía, del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.

No obstante, y pese a que la cuantía económica no es muy elevada, también hay que contar con la publicidad que los propios fabricantes de vehículos eléctricos van a realizar, así como todas las noticias relacionadas con el vehículo eléctrico que continuamente aparecen en los medios de comunicación que, pese a no ser publicidad propiamente dicha, genera una cierta expectación que es el mismo fin de la publicidad.

El resultado del cruce de la curva de influencia de la publicidad con el gasto de publicidad del Gobierno dará como resultado un valor porcentual del público al que ha influenciado la publicidad realizada.

Hay que destacar que el modelo se ha realizado teniendo en cuenta unos planes del Gobierno. Sin embargo algunos documentos de intencionalidad política han quedado obsoletos como se indicará en el bloque del Gobierno, cambiando notablemente las líneas políticas empleadas para el impulso del vehículo eléctrico en España, pero siguen siendo un referente histórico para este trabajo.

### ***Cálculo del Atractivo***

Para realizar el cálculo del atractivo propiamente dicho, tendrán que interrelacionar todas las variables y factores anteriormente descritos, al cual se le añade uno nuevo: se incluye un retardo al atractivo (y finalmente a la compra) debido a la falta de modelos existentes en la actualidad.

Este retardo se ha modelado como una rampa existente entre la mitad del 2010 hasta mediados de 2012, para continuar desde entonces con una constante unitario que indicará que hay una variedad de modelos aceptable (no es que existan tanta diversidad como del vehículo convencional, pero ya hay un número suficiente como para promover la competencia).



**Figura 83: Retardo por la falta de modelos en el mercado.**

Si bien no es cierto del todo, puesto que a comienzos de 2010 sí que existen modelos, pero son tan minoritarios que se pueden aproximar a 0. A medida que se va aproximando al 2012, el número de modelos va creciendo hasta llegar a un punto en que se considera que hay suficiente diversidad (puntos que se ha tomado como inicio de 2012). Se han tomado estos valores puesto que los distintos fabricantes de automóviles mayoritarios, han comenzado a lanzar sus modelos eléctricos a lo largo de 2011 tal y

como se puede ver en el “Barómetro para la introducción del vehículo eléctrico en España” [Instituto11] en el que se detallan todos los modelos de vehículo eléctrico existentes en España y los que se comercializarán en el futuro. Esto no quiere decir que todas las marcas del sector posean un modelo de vehículo eléctrico pero sí que existe un cierto número de modelos como para que el cliente tenga una cierta diversidad de elección.

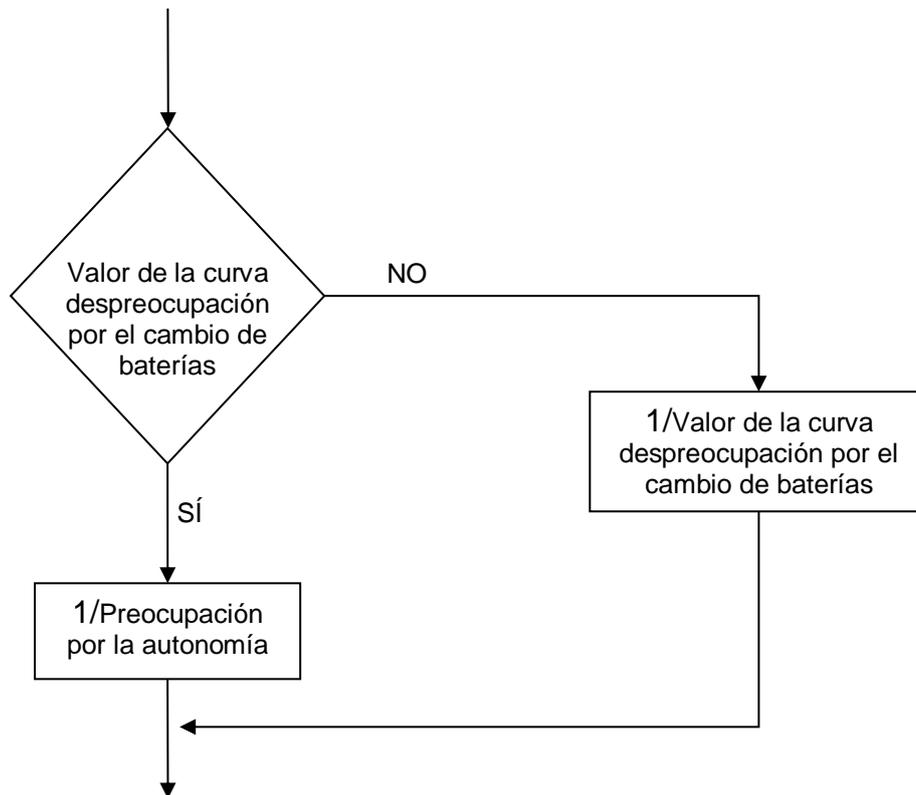
Según esto, se considera que el “atractivo” es una variable proporcional a las variables de “retardo por modelos”, la “amortización”, la “autonomía”, los “puntos de recarga” y la “publicidad” e inversamente proporcional a la “despreocupación por el intercambio de baterías”, como se puede observar a continuación.

$$\text{atractivo} = \text{retardo por modelos} \cdot \text{amortización} \cdot \text{autonomía} \cdot \text{puntos de recarga} \cdot \text{publicidad} \cdot \left( \frac{1}{\text{despreocupación por intercambio de baterías}} \right)$$

Todas las variables se han normalizado a valores entre 0 y 1. No obstante, hay que realizar algunas consideraciones.

Un factor a tener en cuenta es el valor de la despreocupación que tienen los consumidores debido a la existencia de estaciones de cambio de baterías. Al analizar los datos anteriormente explicados, si el ratio de estaciones de cambio de baterías se encuentra comprendido entre 0 y 2.321, la salida de la curva de despreocupación será de 0,75. Por contra, si el ratio es superior a 2.321, la salida de la curva será un valor proporcional hasta llegar a 1 con una entrada de 20.000.

Si la salida de la curva es 0,75, implica que el ratio de estaciones de cambio de baterías es bueno, por lo que la preocupación por la autonomía desaparecerá. En cambio si el valor es distinto, la preocupación por la autonomía descenderá, pero no llegará a desaparecer. Por lo tanto, si el valor de la curva es 0,75, será necesario multiplicar el valor del atractivo por (1/preocupación por la autonomía), mientras que en el caso contrario se multiplicará por (1/valor de la curva de despreocupación). Esto se puede ver en el siguiente diagrama de flujo:



**Figura 84: Diagrama de flujo del valor de la curva de despreocupación por el número de estaciones de intercambio de baterías.**

Esta eliminación de la preocupación por la autonomía a medida que va aumentando el número de estaciones de intercambio de baterías se obtiene de la equiparación del modelo de vehículos eléctricos hacia el modelo de vehículos convencionales. En la siguiente gráfica se pueden ver los resultados de un estudio de implantación de estaciones de intercambio realizado en Australia en el que se corrobora que a medida que se va aumentando el número de estaciones de intercambio el rango de viajes posibles a realizar con el vehículo eléctrico también va aumentando llegando al 100% a partir de un cierto número de estaciones implantadas [McPherson11].

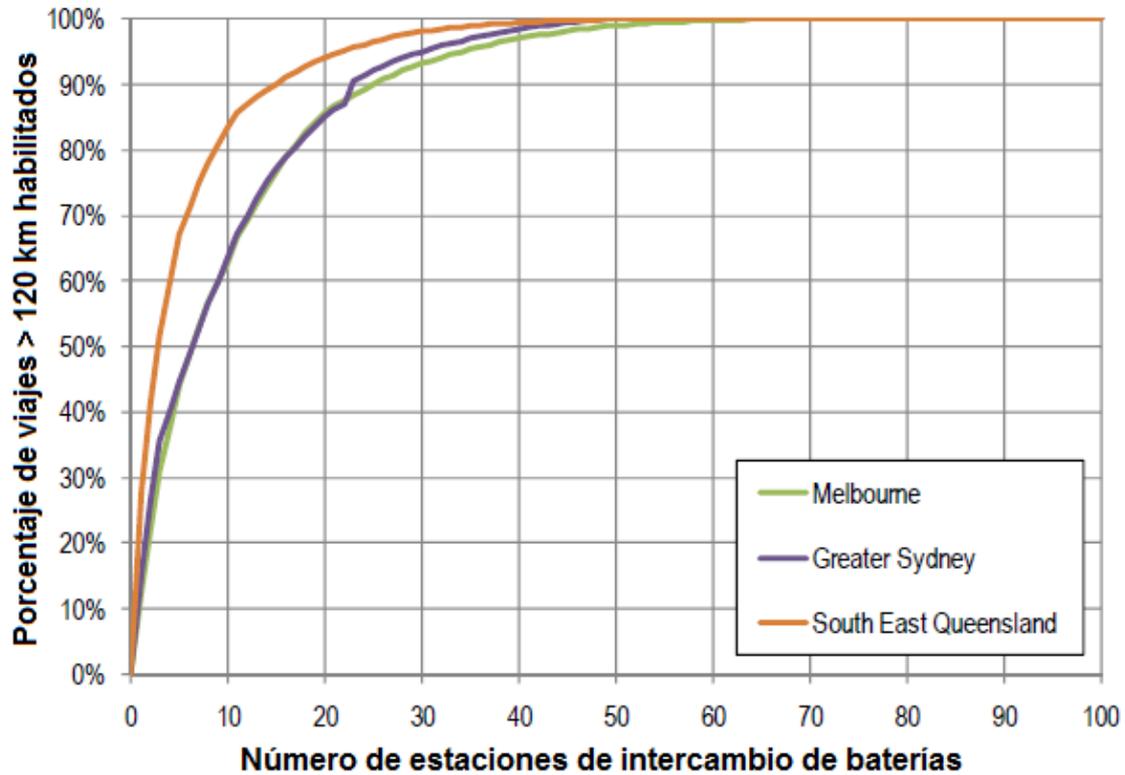


Figura 85: Porcentaje de viajes superiores a 120 km cubiertos en función del número de estaciones de intercambio de baterías [McPherson11].

La expresión final que se ha utilizado en la simulación y que recoge todos estos datos está recogida íntegramente en el anexo de programación con el nombre de variable “atractivo”.

Este valor es el que se ha considerado como el atractivo que el vehículo eléctrico va a tener para el cliente potencial, pero a este valor le falta de añadir el atractivo generado por el boca a boca, con lo que se obtendrá el “ratio de atractivo” que es la salida del bloque.

Según esto, el ratio de atractivo vendrá determinado por la suma del atractivo propio del vehículo eléctrico por sus características propias y del entorno, más el atractivo generado por el boca a boca explicando con anterioridad. Si este valor se multiplica por la renovación prevista del parque automovilístico de manera anual, se obtiene el valor porcentual de vehículos eléctricos que se pueden llegar a adquirir anualmente debido al atractivo del mismo.

La expresión final para el ratio de atractivo que se ha utilizado en la simulación es la incluida en la variable “Ratio de atractivo” en el anexo de programación.

Este ratio de atractivo, además de ser la salida del bloque del atractivo, será la entrada del bloque de la demanda.

## 5.6 Bloque de demanda del vehículo eléctrico

El bloque de la demanda del vehículo eléctrico consiste en relacionar el atractivo del vehículo eléctrico con las características propias del vehículo eléctrico para obtener el número de clientes potenciales.

El modelo del bloque es el que se muestra a continuación.

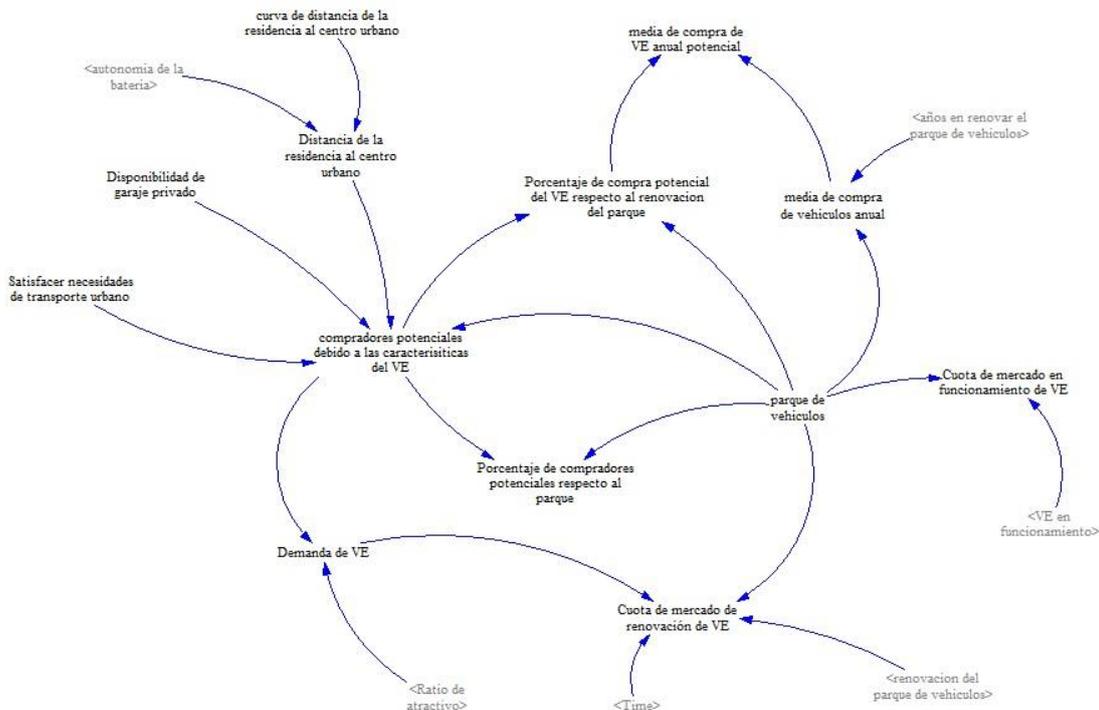
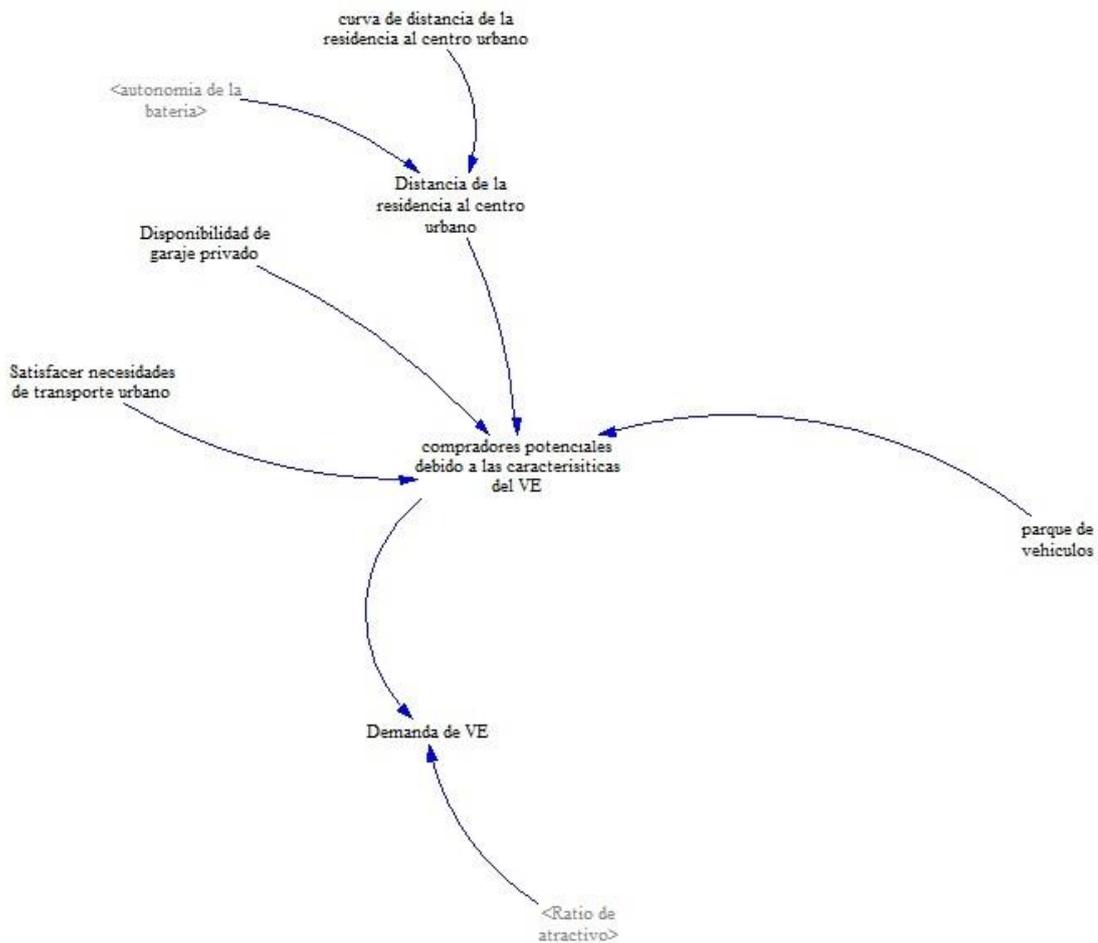


Figura 86: Modelo del bloque de la demanda del vehículo eléctrico.

En él, además de tener las variables propiamente necesarias para el cálculo de la demanda, existen otras que sirven para tener un control más preciso de la evolución del sistema en el tiempo.

Lo primero que se va a estudiar es el método de cálculo de la demanda. La parte del modelo total que se encarga de ello es la siguiente.



**Figura 87: Parte del modelo que calcula la demanda del vehículo eléctrico.**

Se puede observar que la demanda del vehículo eléctrico va a venir determinada por dos factores como se ha mencionado anteriormente, que son, el ratio de atractivo del vehículo eléctrico (calculado en el bloque del atractivo), y el número de compradores potenciales que el vehículo eléctrico va a tener debido a sus características y la relación del posible cliente con ellas. Es decir, pese a todo el atractivo que el vehículo eléctrico pueda tener, hay cierta parte de la población que por el lugar en el que vive, o por el tipo de trayectos que realiza diariamente no va a poder utilizar el vehículo eléctrico.

Estas características, se has modelado atendiendo a tres puntos principales:

- Distancia de la residencia al centro urbano.
- Disponibilidad de garaje propio.
- Necesidad de satisfacer un transporte urbano.

Es decir, el cliente potencial del vehículo eléctrico, va a ser una persona que resida relativamente cerca de una ciudad, que posea garaje propio, y que los trayectos que realice sean de carácter urbano, es decir, por la propia ciudad y no realizando viajes entre ciudades [Race].

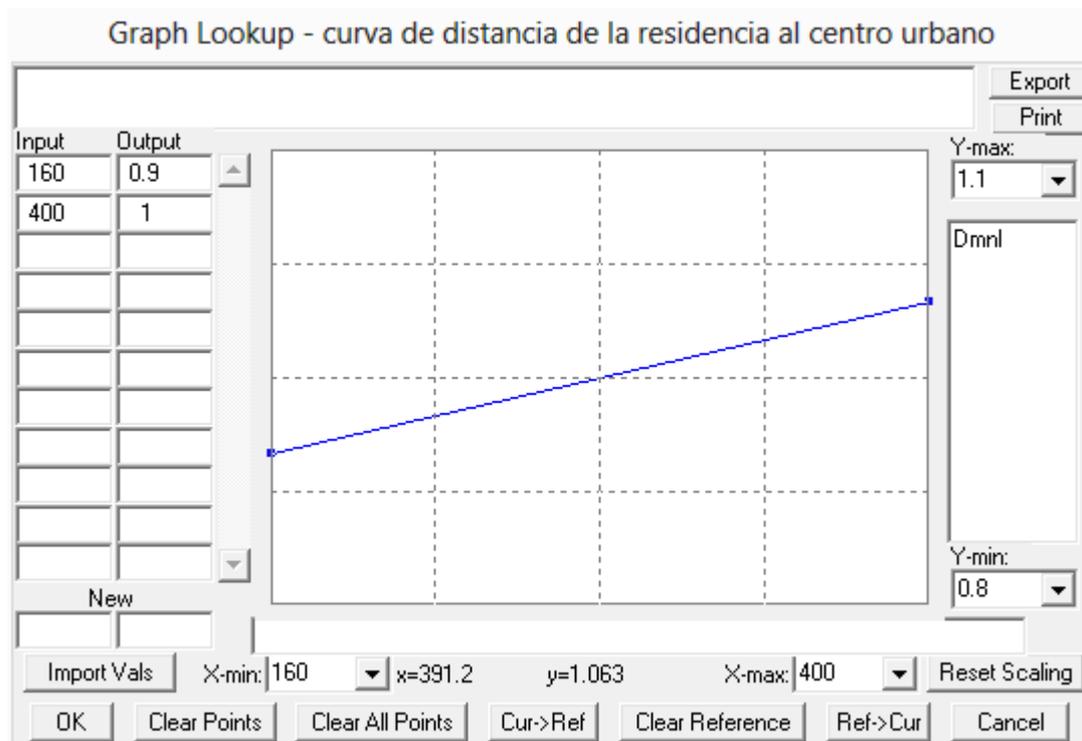
Para el modelado de estas características, se toma como dato de partida la encuesta de RACE [Race], en la cual se indica que el vehículo eléctrico interesa especialmente a usuarios de coche o moto, con residencia a menos de 20 kilómetros del centro de la ciudad (90%), que disponen de garaje privado para estacionar su vehículo (77%), y que quieren satisfacer sus necesidades de desplazamiento en el entorno urbano (83%). Esto es debido a que el concepto de vehículo eléctrico en la actualidad, es el de un segundo vehículo. Para los trayectos largos, es muy probable que el cliente potencial posea un vehículo de combustión interna.

Tanto los datos de la disponibilidad de garaje como de tipo de trayecto se modelarán como constantes para el tiempo estudiado en la simulación, pero no va a suceder lo mismo con el dato de la residencia.

*Disponibilidad de garaje privado = 0.77*

*Satisfacer necesidades de transporte urbano = 0.83*

Para ello, se ha modelado una curva del porcentaje de población que puede utilizar el vehículo eléctrico en función de la localización de su residencia, tomando como dato de partida esta encuesta.



**Figura 88: Modelo de la curva de aumento de la distancia de residencia en función de la autonomía.**

Esta curva tiene como dato de entrada la autonomía media de un vehículo eléctrico, y como salida un porcentaje de población. El dato inicial corresponderá con el dato actual, es decir, con la autonomía actual de la batería de 160 kilómetros, el 90% de la población estaría en disposición de utilizar el vehículo eléctrico debido a la distancia de su residencia con el centro urbano. El otro punto de la recta se extrapola asumiendo la autonomía ya mencionada con anterioridad de 400 kilómetros que se asume como media del vehículo convencional, el 100% de la población podría acceder al vehículo eléctrico debido a su distancia del centro urbano, puesto que es la situación actual con el vehículo convencional.

Al multiplicar estos tres condicionantes del vehículo eléctrico entre sí, se obtiene el porcentaje de población que por las características del vehículo eléctrico puede utilizarlo. Esto es sin tener en cuenta todavía que el cliente esté interesado en el vehículo eléctrico o no, es decir, este valor indica qué porcentaje de población es un cliente potencial.

Al multiplicar este valor por el parque de vehículos [Anfac12], se obtiene una estimación de los clientes potenciales en términos relativos al parque de vehículos, obteniendo la siguiente variable:

*compradores potenciales debido a las características del VE=*

*parque de vehículos\*Disponibilidad de garaje privado\*Distancia de la residencia al centro urbano\*Satisfacer necesidades de transporte urbano*

Si se multiplica este valor recién obtenido por el ratio de atractivo calculado en el bloque del atractivo, se obtendrá el valor de la demanda anual existente en el mercado Español. Hay que tener en cuenta que el ratio de atractivo ya está relativizado a la renovación del parque automovilístico anual, lo que convierte a la demanda en anual también, y no global como se tenía hasta este paso.

*Demanda de VE=*

*compradores potenciales debido a las características del VE\*Ratio de atractivo*

Este valor de la demanda del vehículo eléctrico anual, será la entrada del bloque de fabricación del vehículo eléctrico.

En este punto, se ha considerado interesante realizar una aclaración acerca de la demanda del vehículo eléctrico. Si se analiza el ciclo de aceptación de una nueva tecnología [Moore91] que se muestra en la siguiente figura, se puede ver que la demanda existente en la actualidad únicamente está formada por los innovadores.

## Ciclo de vida de adopción de una tecnología

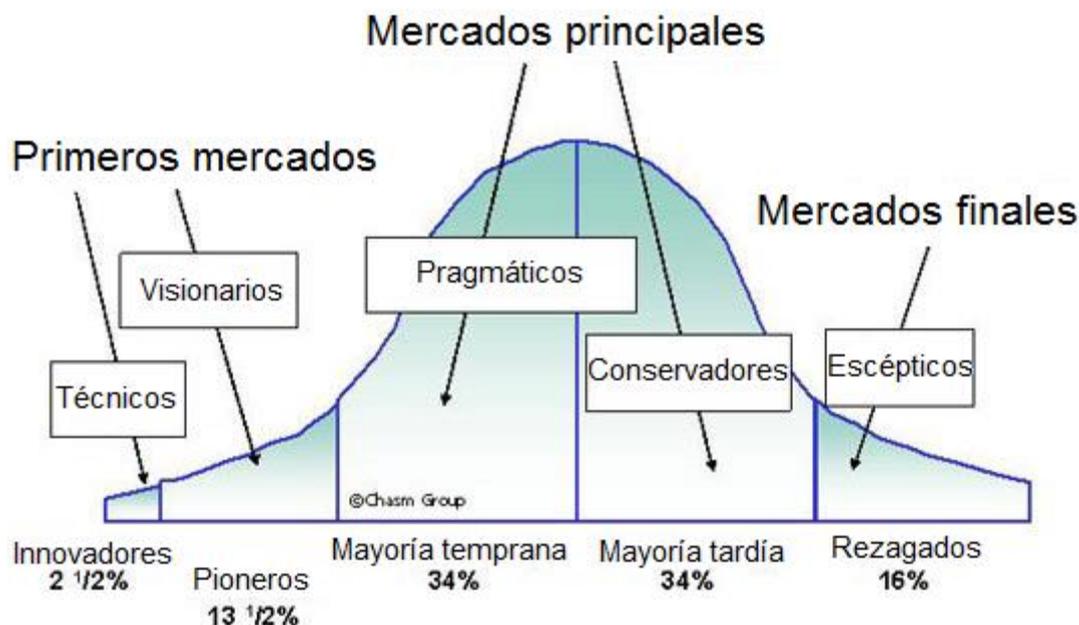


Figura 89: Ciclo de vida de la adopción de una nueva tecnología [Moore91].

Este grupo estará formado principalmente por tres tipos de cliente [Mayor10]:

- Aficionados de los vehículos. Usan el coche todos los días y busca la última tecnología de los automóviles y quiere ser “verde”. Está dispuesto a pagar más por el vehículo eléctrico que por el convencional.
- Ecologistas. Usos de los coches durante los fines de semana y para hacer asuntos ocasionales. Buscan elementos básicos en un coche y quieren ser muy “verdes”. Están dispuestos a pagar más por el vehículo eléctrico pero hasta cierto punto.
- Progresistas pragmáticos. Como los ecologistas, pero con una menor disponibilidad a pagar más por el vehículo eléctrico.

Según este ciclo, y atendiendo a los valores de demanda obtenidos como resultados, se ha considerado importante resaltar que este tipo de consumidores, no va a estar tan influenciado en factores tan determinantes para la media de la población, como puede ser el coste, la dificultad de recarga, autonomía, etc., puesto que son los denominados “innovadores” [Moore91]. Debido al pequeño tamaño de este grupo (inferior al 2,5% de la demanda global), no se espera el denominado “efecto rebote” debido al espacio temporal cubierto por el estudio [Greening00]. Al analizar la curva del

proceso de adopción de vehículo eléctrico que se muestra en la siguiente figura, se ha podido determinar que la fase temporal actual es la de demostración de las habilidades del vehículo eléctrico a gran escala [Brownstone99], [Train04].

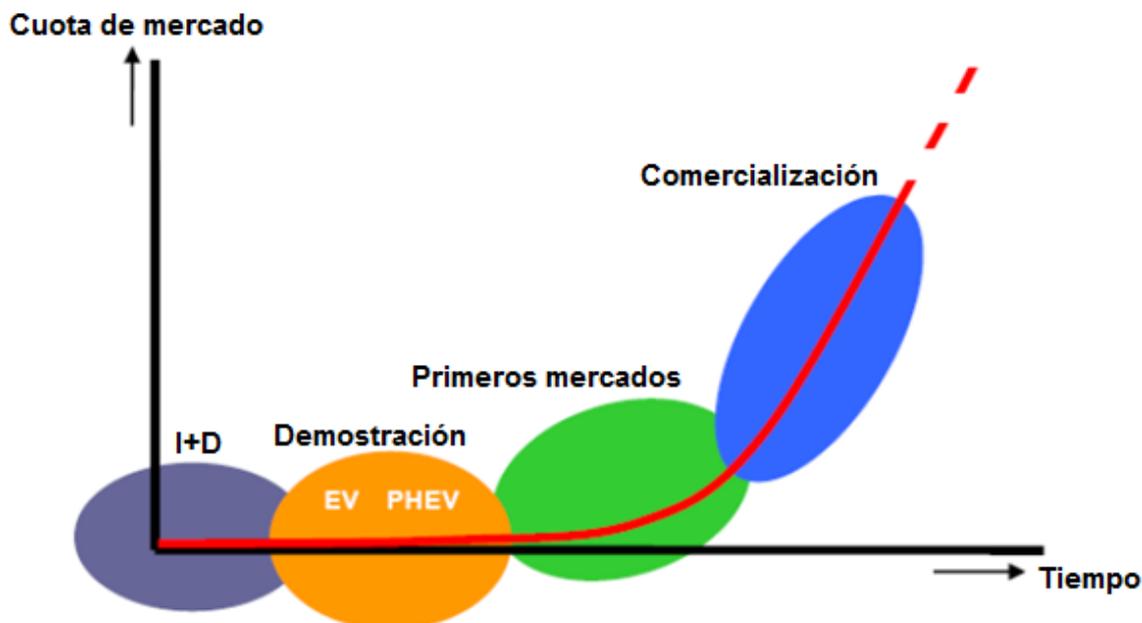


Figura 90: Curva del proceso de adopción de una nueva tecnología [Bongard11].

No obstante, modelar el proceso de adopción del vehículo eléctrico y predecir el momento en el que exista una “adopción en masa” del vehículo eléctrico depende de macro-elementos, pero también del ajuste a las preferencias y criterios de selección de los clientes. En última instancia, el éxito de las innovaciones dependerá de la aceptación de los consumidores [Hauser06]. Se espera un crecimiento exponencial de la población de adoptantes, que se caracterizará por un crecimiento lento pero sostenido en el principio (años 2010-2020), y un crecimiento grande en el extremo (años 2020-2030) [Bongard11].

Según esto, se ha considerado una fase de mercados tempranos alrededor del año 2020, razón por la cual se ha considerado que las especificaciones de los elementos cruciales se cumplen con la mayoría de los consumidores, es decir, pese a que los cálculos no sean en la totalidad precisos, van a ser válidos para este tipo de población.

El resto de variables existentes en el bloque de demanda son variables de control, para poder analizar los resultados, tales como:

*Cuota de mercado de renovación de VE=*

*IF THEN ELSE(Time<2011, 0,Demanda de VE\*100/(renovación del parque de vehículos\*parque de vehículos))*

Consiste en la cuota de mercado respecto a la renovación que el vehículo eléctrico va a tener respecto a la renovación total del parque. Este valor se obtiene al dividir la demanda del vehículo eléctrico anual, entre el total de vehículos que se renuevan anualmente.

*Cuota de mercado en funcionamiento de VE=*

*VE en funcionamiento\*100/parque de vehículos*

Esta variable almacena la penetración del vehículo eléctrico en el mercado, puesto que relativiza el número de vehículos eléctricos respecto al parque total.

*Porcentaje de compra potencial del VE respecto al renovación del parque=*

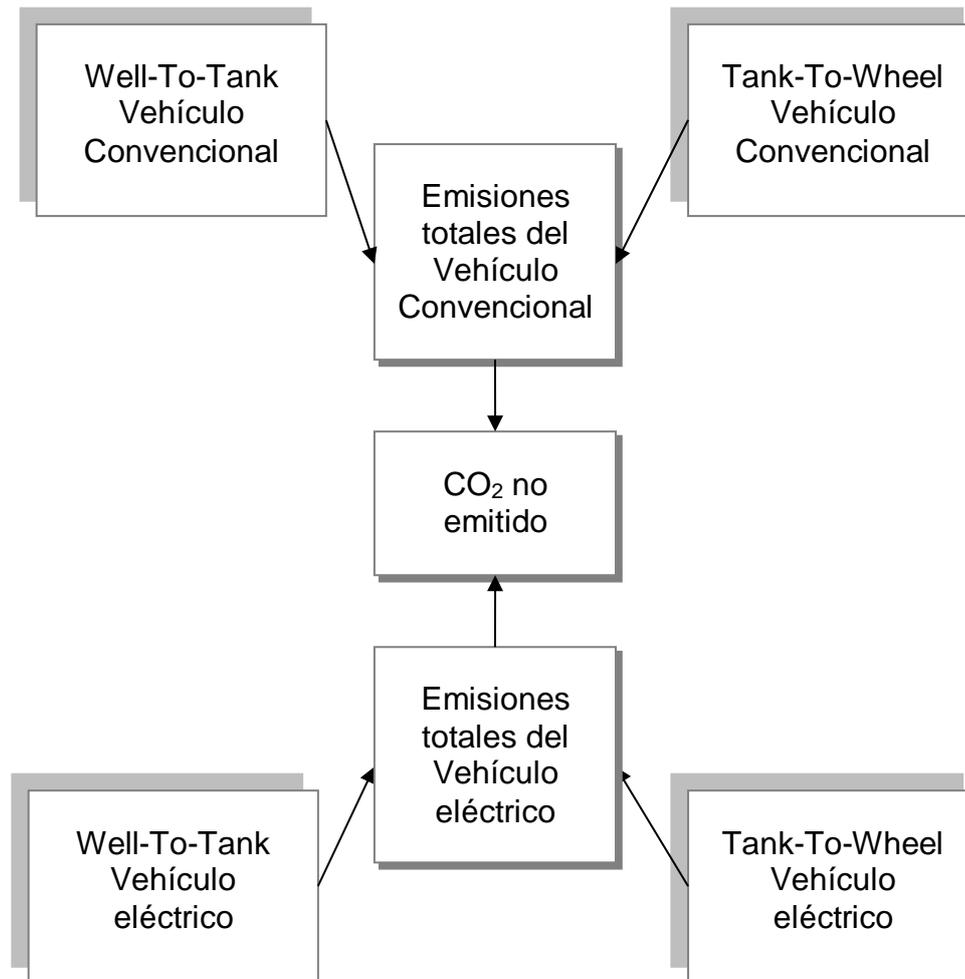
*compradores potenciales debido a las características del VE/parque de vehículos*

En esta variable se almacena el porcentaje de compradores del vehículo eléctrico que pueden existir debido a sus características relativizado al parque total de vehículos.

## **5.7 Bloque del medio ambiente**

En este bloque se van a tratar las diferencias en cuanto a las emisiones de CO<sub>2</sub> se refiere, entre el vehículo convencional y el vehículo eléctrico.

El bloque posee una cierta complejidad, por lo que para una mejor comprensión del mismo, se ha dividido en 5 sub-bloques: emisiones *Well-To-Tank* del vehículo convencional, emisiones *Well-To-Tank* del vehículo eléctrico, emisiones *Tank-To-Wheel* del vehículo convencional, emisiones *Tank-To-Wheel* del vehículo eléctrico y el CO<sub>2</sub> no emitido. El diagrama de bloques será el siguiente:



**Figura 91: Diagrama de bloques del bloque de medio ambiente.**

A este diagrama de bloques, habrá que añadir otro sub-bloque relacionado con la energía que ambos tipos de vehículos van a consumir. En este estudio no se han considerado las emisiones de CO<sub>2</sub> ocasionadas en el proceso de fabricación, producción y venta de los vehículos. Por ello, implícitamente, se ha asumido que las emisiones generadas en la producción en cadena de ambos tipos de vehículos son similares, y por tanto no se tienen en cuenta en este estudio.

Antes de comenzar con la explicación de los sub-bloques, es necesario explicar el significado de *Well-To-Tank* y *Tank-To-Wheel*.

Existen un número considerable de combustibles utilizados para el transporte por carretera. Cada combustible puede producirse a partir de un único o varios recursos como fuente de energía primaria. La combinación de las medidas necesarias para convertir un recurso en combustible y llevar ese combustible hasta un vehículo se define

como *Well-To-Tank* (del pozo al tanque). Con esto, se consigue evaluar las emisiones de un combustible frente a otro considerando el ciclo de vida completo, es decir, desde el origen de la energía primaria de donde se obtiene hasta su utilización en el vehículo. De esta manera, se considerarán las emisiones correspondientes al proceso de extracción, refino y distribución del combustible hasta el depósito del vehículo.

En cuanto al *Tank-to-Wheel* (del tanque a la rueda), se puede considerar como el consumo de energía para el movimiento de los vehículos, la utilización de los servicios auxiliares (como pueden ser la iluminación, el sistema de calefacción, el aire acondicionado, etc.), las pérdidas (en el motor y en la transmisión) y las emisiones generadas en este proceso del movimiento del vehículo.

La suma de ambos valores dará como resultado el concepto *Well-To-Wheel* (del pozo a la rueda) que contendrá las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas al ciclo de vida del vehículo desde la generación del combustible a emplear, hasta el consumo del mismo por el vehículo.

Estos dos conceptos van a permitir comparar vehículos de diferentes tecnologías y determinar las emisiones de CO<sub>2</sub> que se generan con uno y con otro. En la siguiente imagen se puede ver un esquema explicativo de la diferencia de estos conceptos.

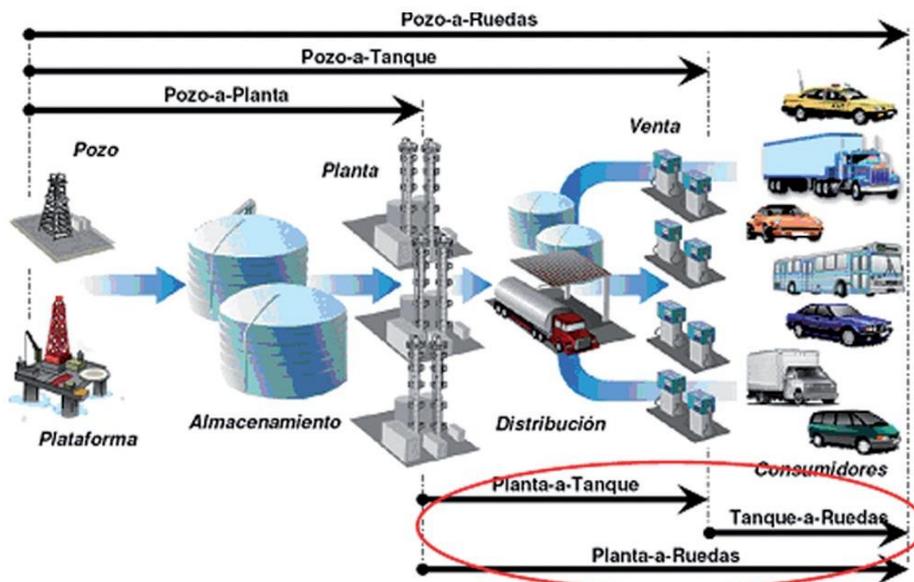


Figura 92: Esquema de los diferentes ciclos [Laboratorio09].

### Sub-bloque Well-To-Tank del vehículo convencional

El diagrama de este sub-bloque es el siguiente:

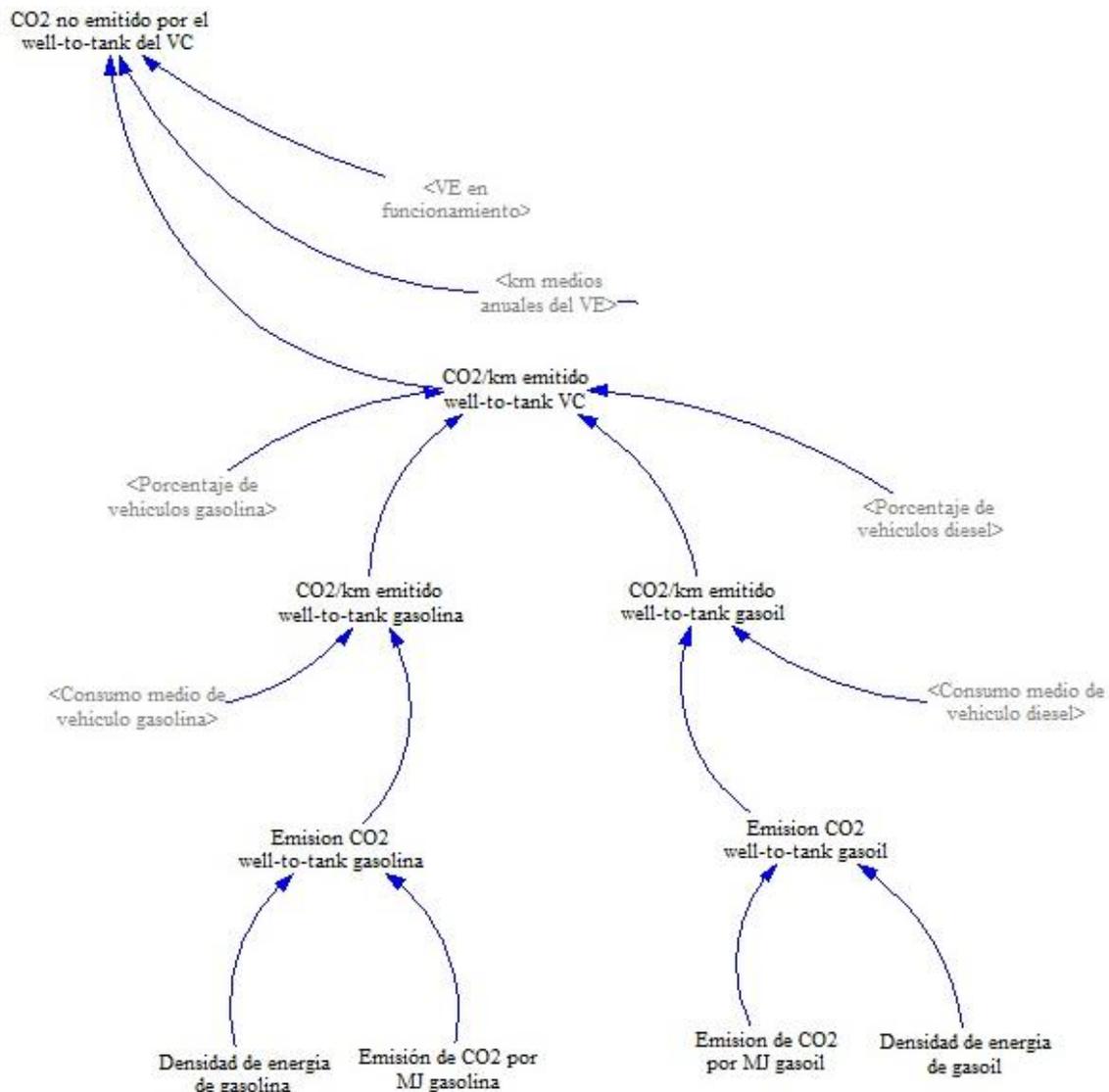


Figura 93: Modelo del Well-To-Tank del vehículo convencional.

Para calcular el *Well-To-Tank* de la gasolina y del gasoil, se va tener en cuenta tanto la producción y el acondicionamiento de la fuente, como el transporte del combustible hasta los mercados, o en este caso gasolineras.

El petróleo crudo es extraído en general, bajo presión natural de la reserva subterránea. En algunos casos, puede ser necesario aumentar la presión del yacimiento mediante la inyección de gas. En la mayoría de los casos, el petróleo está asociado con

gases y necesita ser estabilizado antes de su envío, siendo la separación con agua a veces necesaria.

Las condiciones de producción varían considerablemente entre las regiones productoras, los campos e incluso entre pozos individuales, por lo que sólo tiene sentido considerar el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero promedio.

Por otro lado, el crudo tiene que ser transportado desde las zonas de producción a las refinerías en Europa. El petróleo crudo es transportado principalmente por vía marítima. El tipo de embarcación empleada dependerá de la distancia a cubrir. La mayor parte del crudo arábigo se transporta en buques de gran tamaño que pueden transportar entre 200 y 500 kTon. Las tuberías también son ampliamente utilizadas desde los campos de producción hasta las terminales marítimas.

Aunque la mayoría de las refinerías tienden a estar en lugares costeros, algunas de ellas se encuentran lejos del mar. Según esto, una vez más, hay una gran diversidad de situaciones prácticas.

A continuación, se va a analizar el refinamiento del crudo: Tradicionalmente, el petróleo crudo se transporta como tal, y es refinado cerca de los mercados. La mayor parte de los combustibles vendidos en Europa son fabricados en las refinerías europeas. Por ello, en este estudio se asume que los combustibles basados en petróleo crudo se fabrican a partir de petróleo crudo en las refinerías europeas.

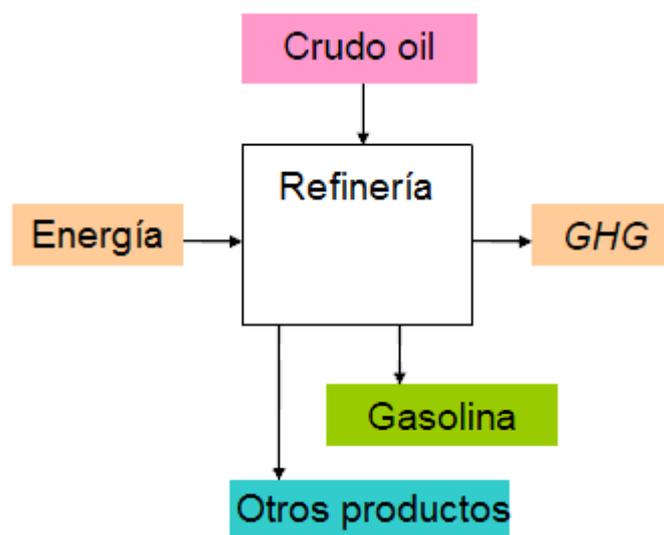
Una refinería de petróleo es una compleja combinación de plantas de proceso, cuyo objetivo es convertir el crudo en productos comercializables con la calidad adecuada y en las cantidades adecuadas. Esto implica realizar tareas como la separación física de los componentes del crudo, tratar de eliminar compuestos como el azufre, y la conversión de las moléculas pesadas en moléculas más ligeras para que las producciones coincidan con la demanda del mercado.

Las refinerías europeas consumen aproximadamente el 6% de su consumo propio como la energía de procesamiento [Eucar06]. La mayor parte de la energía utilizada por las refinerías proviene del consumo de petróleo crudo. Las refinerías

quemar gas (principalmente generados en los procesos de refinería), así como combustibles líquidos y sólidos.

Las refinерías de petróleo producen una serie de productos diferentes al mismo tiempo, procedentes de una materia prima única. Considerando que el total de la energía (y otros recursos) utilizado por las refinерías está bien documentado, no hay ninguna manera sencilla para asignar la energía y las emisiones de un producto específico. La distribución de los recursos utilizados en la refinación, entre los diferentes productos siempre implica el uso de criterios de reparto arbitrarios que pueden tener una influencia importante en los resultados.

En el siguiente diagrama se puede observar un descriptivo de lo explicado hasta ahora.



**Figura 94: Descriptivo del proceso de refinamiento del petróleo [Eucar06].**

En las siguientes gráficas se pueden observar los valores utilizados en el estudio [Eucar06]. En la primera se muestra la energía empleada para la obtención de cada MJulio del combustible.

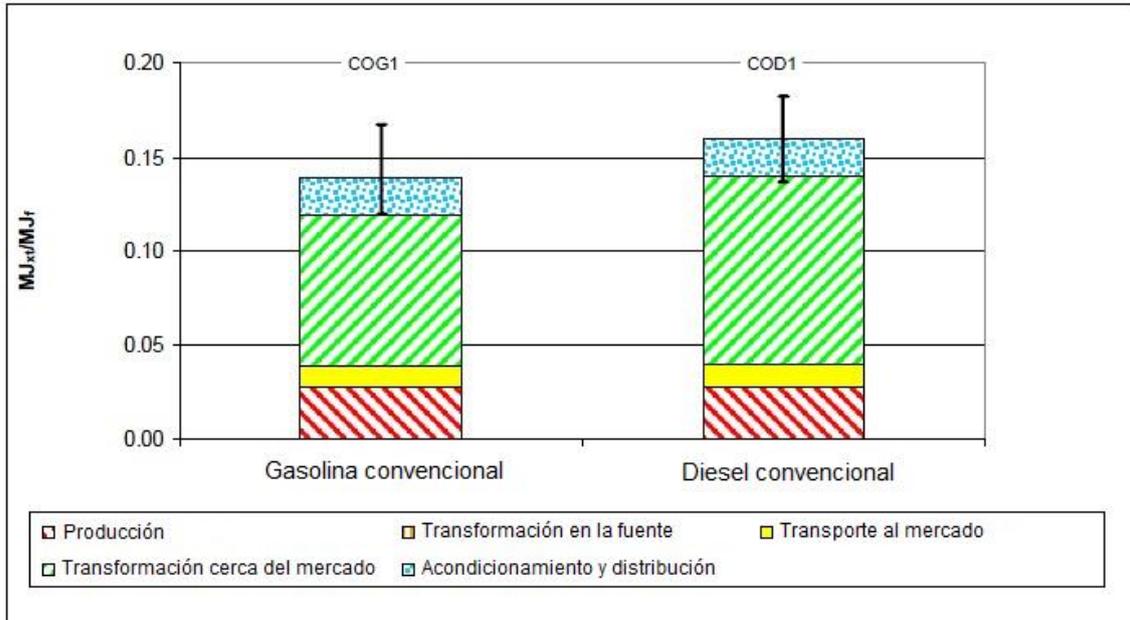


Figura 95: Energía empleada para la obtención de 1 MJ de combustible [Eucar06].

Estos datos desglosados en las diferentes fases son los siguientes:

(MJ/MJ combustible)	TOTAL ENERGÍA	PRODUCCIÓN DE LA FUENTE	TRANSPORTE A REFINERÍA	TRANSFORMACIÓN EN REFINERÍA	DSITRIBUCIÓN
GASOLINA	0,14	0,03	0,01	0,08	0,02
GASOIL	0,16	0,03	0,01	0,10	0,02

Tabla 13: Energía empleada para la obtención de 1 MJ de combustible desglosada en fases [Eucar06].

En la siguiente se puede ver las emisiones de CO<sub>2</sub> emitidas en la obtención de cada MJ del combustible.

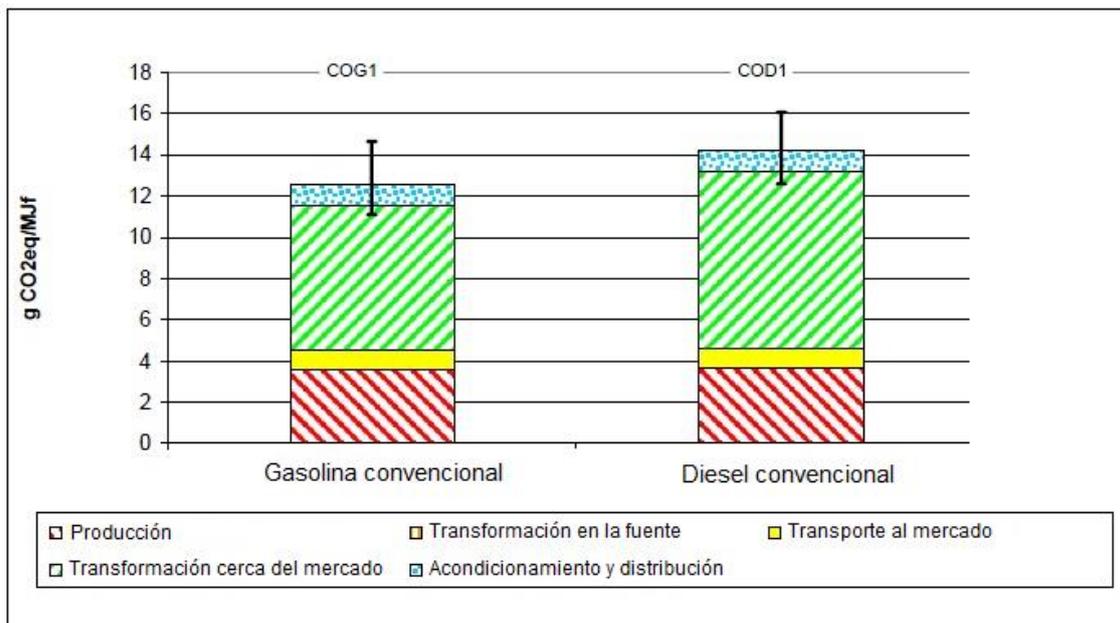


Figura 96: Emisiones de CO<sub>2</sub> para la obtención de 1 MJ de combustible [Eucar06].

Los datos desglosados son los siguientes:

(g CO <sub>2</sub> eq/MJ combustible)	TOTAL EMISIÓN	PRODUCCIÓN DE LA FUENTE	TRANSPORTE A REFINERÍA	TRANSFORMACIÓN EN REFINERÍA	DSITRIBUCIÓN
GASOLINA	13	4	1	7	1
GASOIL	14	4	1	9	1

Tabla 14: Emisiones de CO<sub>2</sub> generadas para la obtención de 1 MJ de combustible desglosada en fases [Eucar06].

Una vez se ha obtenido el valor de las emisiones de CO<sub>2</sub> por cada MJ de combustible que se genera, simplemente al multiplicarlo por el total de MJ que posee un litro de dicho combustible (que es el valor de la densidad de energía) se obtendrán las emisiones de CO<sub>2</sub> del *Well-To-Tank* por cada litro de combustible.

Para la gasolina, se conoce que la densidad es de 745 kg/m<sup>3</sup> con una energía por cada kg de 43,2 MJ/kg, con lo que se obtiene una densidad de energía de 32,184 MJ/l [Eucar06].

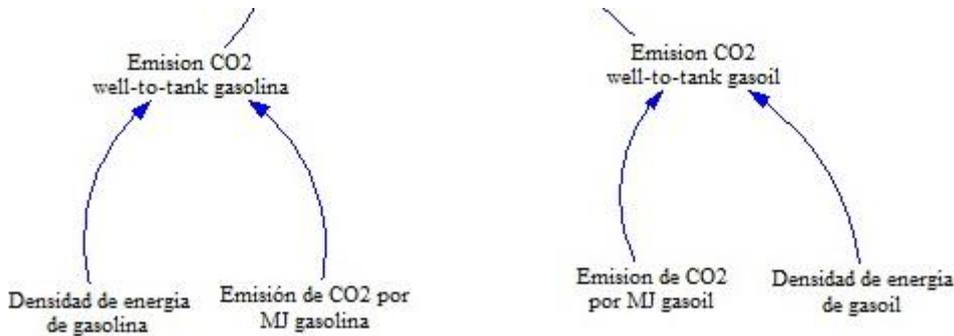
Para el caso del gasoil, los cálculos son similares: la densidad es de 832 kg/m<sup>3</sup>, con una energía de 43,1 MJ/kg, se obtiene una densidad de energía de 35,8592 MJ/l [Eucar06].

Estos valores se almacenarán en las variables del modelo siguientes:

*Densidad de energía de gasolina = 32.184*

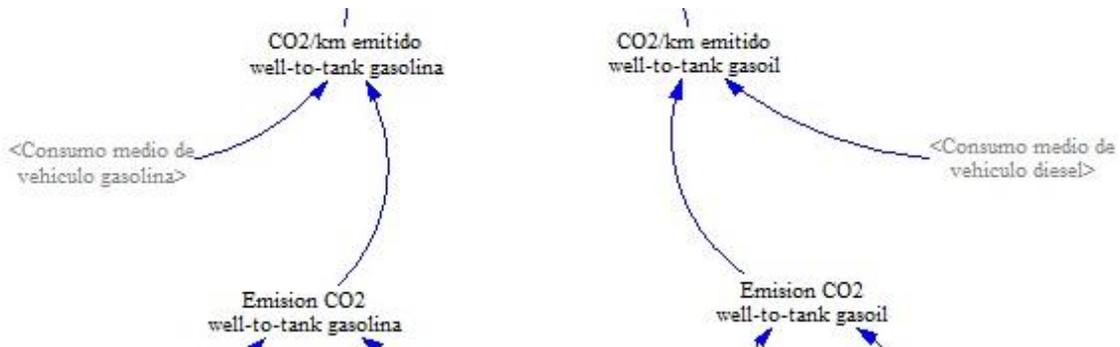
*Densidad de energía de gasoil = 35.8592*

Estos dos valores están relativizados a litros de combustible, es decir, cada litro de gasolina, posee aproximadamente 32 MJ, mientras que cada litro de gasoil posee aproximadamente 36 MJ. Al utilizar los datos de emisiones anteriormente mencionados, se han determinado las emisiones de CO<sub>2</sub> del *Well-To-Tank* por cada litro de combustible utilizado por un vehículo convencional.



**Figura 97: Modelo del *Well-To-Tank* de los combustibles del vehículo convencional.**

Al multiplicar estos valores por el consumo medio de un vehículo convencional por cada kilómetro, se ha obtenido el valor de las emisiones de CO<sub>2</sub> del *Well-To-Tank* por cada kilómetro recorrido por el vehículo convencional.



**Figura 98: Modelo del cálculo de emisiones de CO<sub>2</sub> por el *Well-To-Tank* de cada combustible del vehículo convencional.**

En este momento se han obtenido los valores de las emisiones de CO<sub>2</sub> *Well-To-Tank* por cada kilómetro recorrido en vehículo de gasolina y en un vehículo diesel. Al relativizar estos valores al porcentaje de vehículos de cada tipo, se han determinado las emisiones de un vehículo convencional medio.



**Figura 99: Modelo del cálculo de CO<sub>2</sub> por el *Well-To-Tank* por cada kilómetro recorrido por un vehículo convencional medio.**

$$\text{"CO2/km emitido Well-To-Tank VC"} =$$

$$(\text{"CO2/km emitido Well-To-Tank gasoil"} * \text{Porcentaje de vehículos diesel}) + (\text{"CO2/km emitido Well-To-Tank gasolina"} * \text{Porcentaje de vehículos gasolina})$$

El valor ponderado medio que se obtiene es de 31,89 g CO<sub>2</sub>/km recorrido.

Por último, se ha multiplicado esta variable por el número de vehículos eléctricos existentes, y por la media de kilómetros recorridos anualmente, obteniendo el valor de las emisiones de CO<sub>2</sub> no emitidas a la atmósfera anualmente, a causa del *Well-To-Tank* de los vehículos convencionales que han sido sustituidos por vehículos eléctricos.

$$\text{"CO2 no emitido por el Well-To-Tank del VC"} =$$

$$\text{"CO2/km emitido Well-To-Tank VC"} * \text{km medios anuales del VE} * \text{VE en funcionamiento} * (1/1e+006)$$

### ***Sub-bloque Tank-To-Wheel del vehículo convencional***

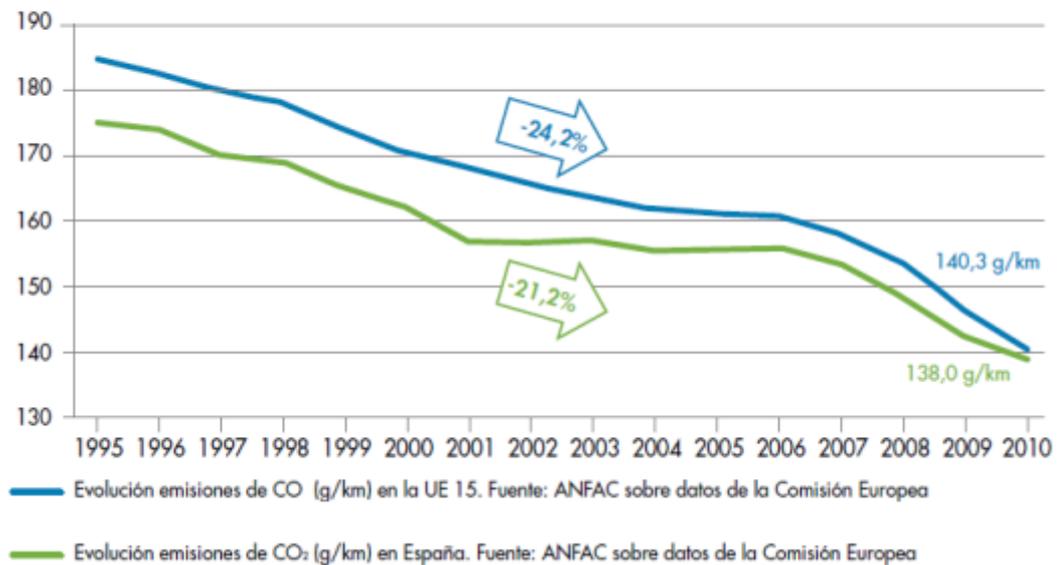
En cuanto al *Tank-To-Wheel* del vehículo convencional, corresponde a las emisiones que el vehículo convencional va a emitir por su propia utilización. Estas emisiones de CO<sub>2</sub> se producen por la quema del combustible y son expulsadas a través del tubo de escape. La cantidad de CO<sub>2</sub> emitida, atendiendo únicamente al tipo del

vehículo (sin tener en cuenta la forma de conducción), dependerá de la cantidad de energía necesaria para circular y de la eficiencia del motor. Además, la cantidad de energía necesaria dependerá del peso del vehículo y de su potencia. Por tanto, a mayor potencia y mayor peso, mayor consumo de combustible y mayores emisiones de CO<sub>2</sub>.

Según esto, y para simplificar el modelo, se toma un valor medio teniendo en cuenta los valores de los actuales vehículos a la venta, puesto que se pretende modelar el ahorro de emisiones de CO<sub>2</sub> al adquirir un vehículo eléctrico frente a uno convencional.

En la siguiente gráfica se puede observar la evolución de la media de emisiones de CO<sub>2</sub> para un vehículo de nueva adquisición. Se puede ver claramente la gran reducción que ha existido en los últimos años causado en gran medida por las regulaciones de la Unión Europea.

### Emisiones medias de CO<sub>2</sub>

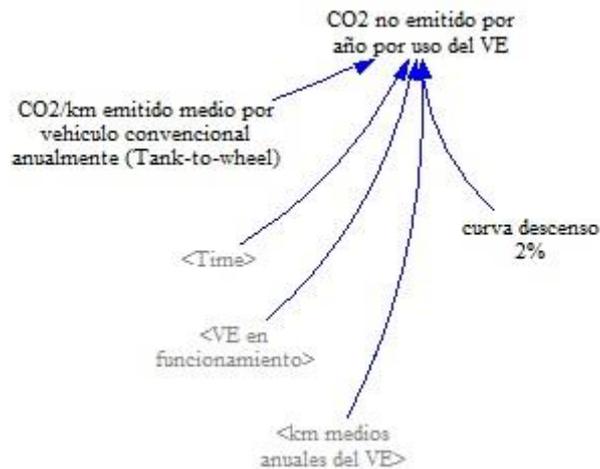


**Figura 100: Emisiones CO<sub>2</sub> medias en la adquisición de un nuevo vehículo en la Unión Europea [Anfac12].**

Se conoce que el valor medio de las emisiones de CO<sub>2</sub> por kilómetro recorrido de los automóviles adquiridos en el año 2010 fue de casi 138 g CO<sub>2</sub>/km [Anfac12], y ese será el valor de partida que se tomará.

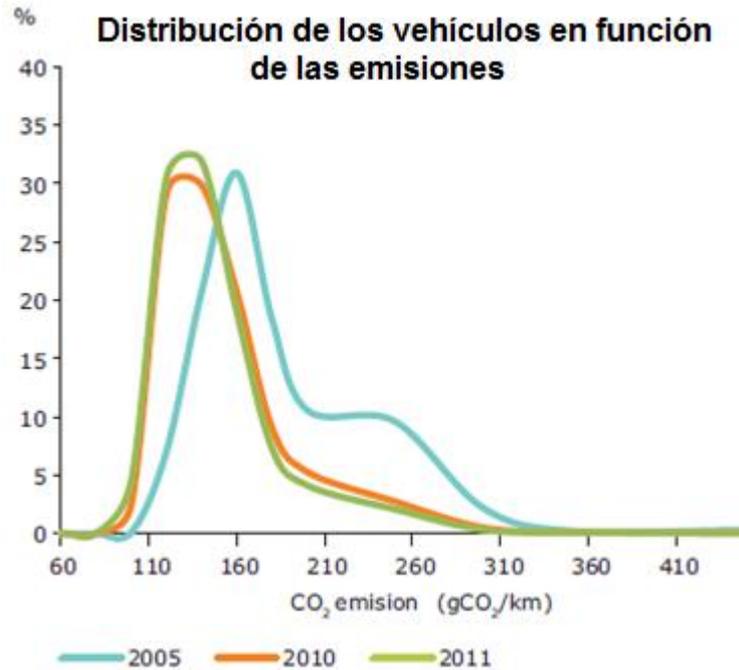
"CO<sub>2</sub>/km emitido medio por vehículo convencional anualmente (Tank-to-wheel)" = 138

El diagrama del modelo será el siguiente.



**Figura 101: Modelo del CO<sub>2</sub> por el Well-To-Tank no emitido por la utilización del vehículo eléctrico.**

El valor de las emisiones de CO<sub>2</sub> que se producen por un vehículo, se ha ido reduciendo en los últimos años gracias a las mejoras en la eficiencia de los motores. Debido a esto, no es lógico mantener este valor constante. Por esto, se ha introducido un descenso de un 2% anual en este valor que ha sido estimado. Este valor no es arbitrario y viene corroborado por varios estudios [Berr08] al menos hasta el año 2020. A partir de esta fecha se prevé que la reducción no sea tan elevada, pasando a ser cercana al 1%. Este dato también se verá apoyado por la cada vez mayor tendencia de adquirir vehículos con un valor inferior de emisiones de CO<sub>2</sub>. En la siguiente figura se puede ver la distribución de la compra de vehículos en cuanto a emisiones de CO<sub>2</sub> se refiere.



**Figura 102: Distribución de los nuevos vehículos en función de sus emisiones [Eea12].**

La mayor parte de las adquisiciones de nuevos vehículos se centran principalmente en vehículos con valores bajos de emisiones de CO<sub>2</sub> lo que hará bajar paulatinamente el valor medio de emisiones, también teniendo en cuenta que la regulación de emisiones de CO<sub>2</sub> establece un objetivo de emisiones de CO<sub>2</sub> promedio obligatorio para los nuevos vehículos de pasajeros de 130 g de CO<sub>2</sub>/km para 2015 y 95 g de CO<sub>2</sub>/km para 2020 [Efte09].

De hecho, los motores diesel avanzados de nueva generación presentarán una fuerte competencia para los vehículos eléctricos en los próximos años. Todos los principales fabricantes de automóviles están lanzando vehículos diesel más eficientes basados en ciertas tecnologías como la turboalimentación y el diesel common rail.

Si se multiplica el valor de las emisiones medias de un vehículo convencional, por los kilómetros medios recorridos, y por el número de vehículos eléctricos, se podrá determinar de manera anual, las emisiones de CO<sub>2</sub> no emitidas gracias a la sustitución de vehículos convencionales por vehículos eléctricos.

$$CO_2 \text{ no emitido por año por uso del VE} =$$

$VE \text{ en funcionamiento} * "CO_2/km \text{ emitido medio por vehículo convencional anualmente (Tank-to-wheel)}" * km \text{ medios anuales del VE} * (1/1e+006) * "curva \text{descenso } 2\%"(Time)$

### Sub-bloque Well-To-Tank del vehículo eléctrico

Al igual que ocurría en el vehículo convencional, la generación de la electricidad necesaria para la utilización del vehículo eléctrico, implica una generación de emisiones de CO<sub>2</sub>, que dependerán de cómo se obtenga dicha electricidad.

Dependiendo del mix energético que exista en un determinado momento del tiempo, las emisiones de CO<sub>2</sub> del *Well-To-Tank* del vehículo eléctrico variarán de manera considerable.

El modelo se encuentra a continuación.

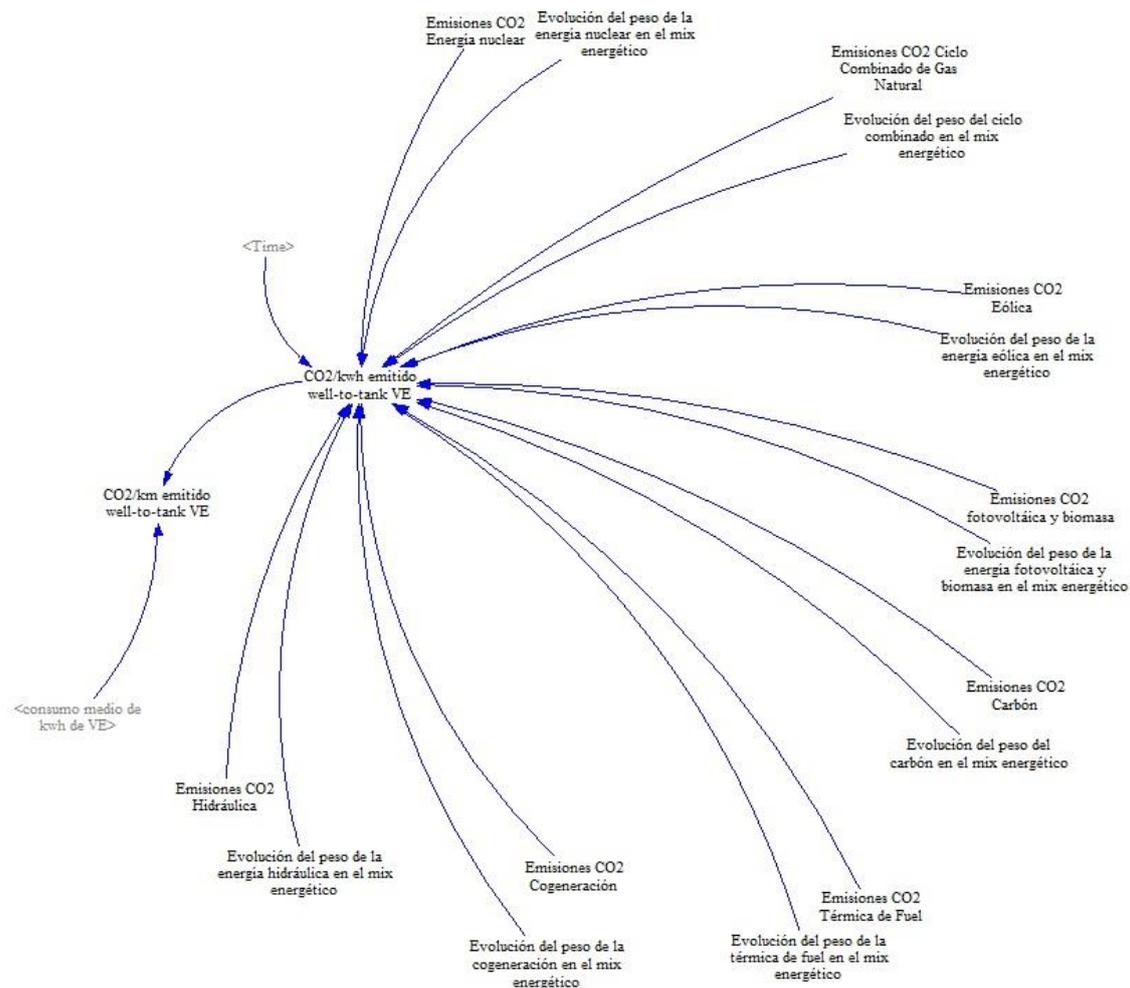


Figura 103: Modelo del *Well-To-Tank* del vehículo eléctrico.

En el modelo se han incluido todas las posibles fuentes para la obtención de la energía eléctrica, y se ha creado unas curvas para poder modelar su evolución dentro del mix energético español en el tiempo. Pese a ello, las proporciones de las diversas fuentes en el mix de generación eléctrica, se han mantenido constantes a lo largo de la simulación, puesto que el determinar la evolución que las mismas van a sufrir en los próximos años, es un trabajo que está fuera del objeto de esta tesis.

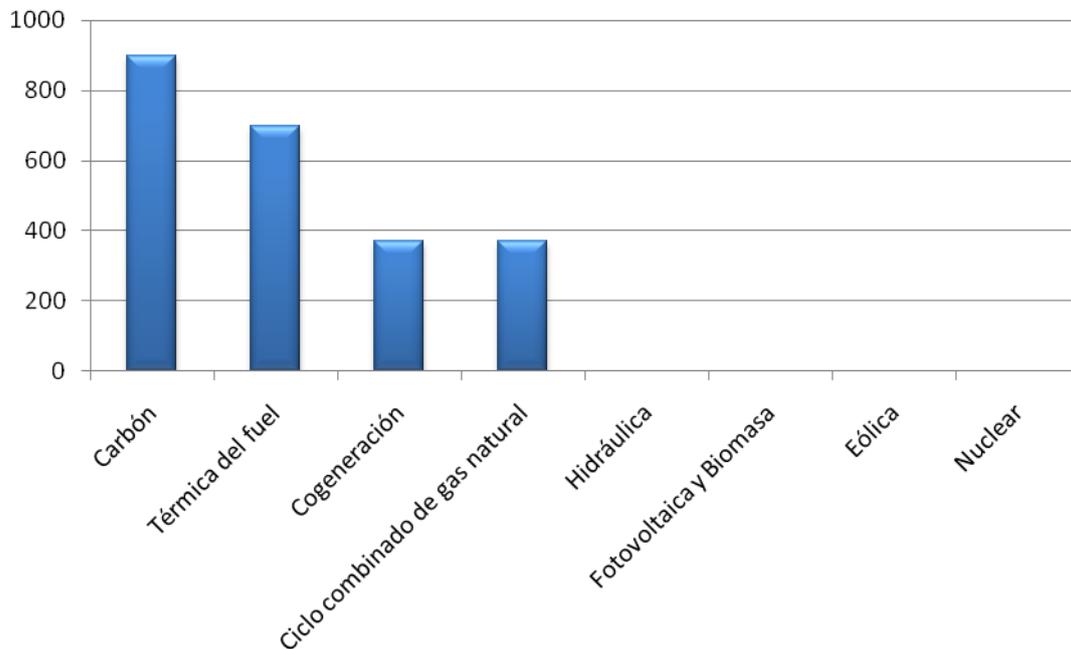
Así pues, las diversas fuentes desde las que se pueden obtener la energía eléctrica y las emisiones que generan son las siguientes [Ree]:

<b>FUENTE</b>	<b>gCO<sub>2</sub> emitidos al generar un kWh</b>
<b>CARBÓN</b>	950
<b>TÉRMICA DE FUEL</b>	700
<b>COGENERACIÓN</b>	370
<b>CICLO COMBINADO DE GAS NATURAL</b>	370
<b>HIDRÁULICA</b>	0
<b>FOTOVOLTAICA Y BIOMASA</b>	0
<b>EÓLICA</b>	0
<b>NUCLEAR</b>	0

**Tabla 15: Emisiones CO<sub>2</sub> que se generan para obtener un kWh en las diferentes fuentes energéticas [Ree].**

Lo que se puede observar en la siguiente gráfica.

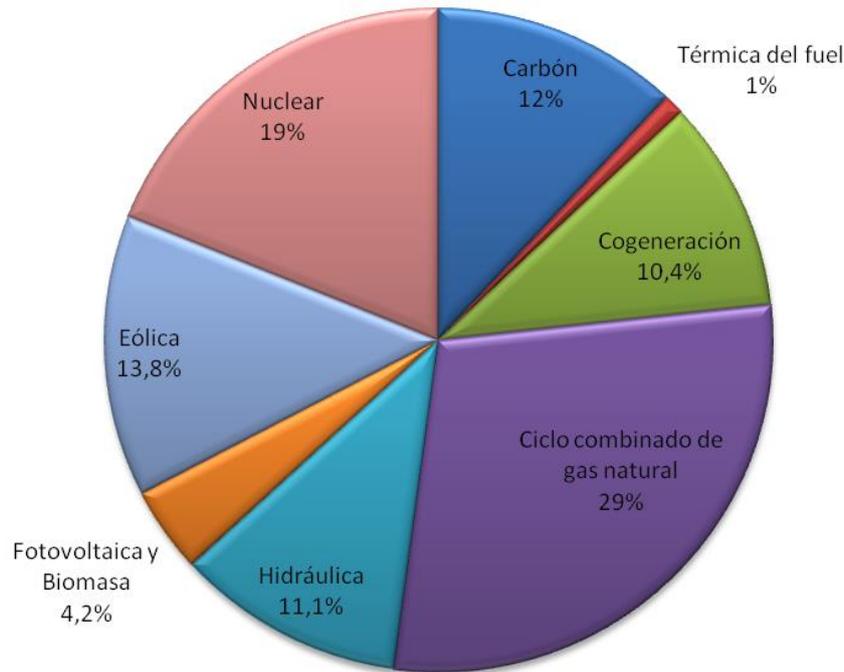
## Emisiones CO<sub>2</sub> (g/kWh)



**Figura 104: Emisiones de CO<sub>2</sub> por cada kWh generado atendiendo a la tecnología de origen.**

A la vista de los valores queda claramente evidenciado que las emisiones de CO<sub>2</sub> del vehículo eléctrico en la fase *Well-To-Tank* están muy influenciadas por la manera en la que se obtenga la electricidad. Según esto, el vehículo eléctrico sería capaz de generar cero emisiones de CO<sub>2</sub> en la fase *Well-To-Tank* si toda la electricidad que utilizase proviniese de fuentes renovables. Según lo que se ha explicado, será necesario conocer de qué fuente de energía (o lógicamente el porcentaje de cada una) que le llega al vehículo eléctrico. Para ello, se tiene que analizar el mix eléctrico español de generación de energía eléctrica, puesto que en el estudio se analiza la movilidad eléctrica en España. Para la realización de la tesis se ha tomado como referencia el siguiente:

## Mix de generación eléctrica



**Figura 105: Mix eléctrico Español en el 2012 [Ree].**

Al multiplicar cada peso relativo de cada fuente de energía, por las emisiones de CO<sub>2</sub> que se generan, se obtiene el valor medio de emisiones de CO<sub>2</sub> que se emiten en la generación de 1 kWh relativizado en función del mix eléctrico existente.

*"CO2/kwh emitido Well-To-Tank VE"=*

*(Emisiones CO2 Carbón\*Evolución del peso del carbón en el mix energético(Time))+ (Emisiones CO2 Ciclo Combinado de Gas Natural\*Evolución del peso del ciclo combinado en el mix energético(Time))+ (Emisiones CO2 Cogeneración\*Evolución del peso de la cogeneración en el mix energético(Time))+ (Emisiones CO2 Energía nuclear\*Evolución del peso de la energía nuclear en el mix energético(Time))+ (Emisiones CO2 Eólica\*Evolución del peso de la energía eólica en el mix energético(Time))+ (Emisiones CO2 fotovoltaica y biomasa\*Evolución del peso de la energía fotovoltaica y biomasa en el mix energético(Time))+ (Emisiones CO2 Hidráulica\*Evolución del peso de la energía hidráulica en el mix energético(Time))+ (Emisiones CO2 Térmica de Fuel\*Evolución del peso de la térmica de fuel en el mix energético(Time))*

Si se multiplica este valor por el consumo medio de un vehículo eléctrico para realizar un kilómetro, se obtiene el valor del *Well-To-Tank* para recorrer un kilómetro con un vehículo eléctrico de media.

*"CO2/km emitido Well-To-Tank VE"=*

*"CO2/kwh emitido Well-To-Tank VE"\*consumo medio de kwh de VE*

Por último, si este valor se multiplica por el número de kilómetros medios que un vehículo eléctrico recorre, y por el número de vehículos eléctricos que hay en funcionamiento, se obtendrá el total de CO<sub>2</sub> emitido anualmente debido al *Well-To-Tank* del vehículo eléctrico.

*"CO2 emitido por año por el Well-To-Tank del VE"=*

*"CO2/km emitido Well-To-Tank VE"\*km medios anuales del VE\*VE en funcionamiento\*(1/1e+006)*

Es necesario mencionar que, el valor real de las emisiones de CO<sub>2</sub> va a depender del momento en el tiempo, del clima, del mix de generación eléctrica y de la localización. Debido a esto el valor real de las emisiones es muy difícil de determinar, por lo que se toman los valores medios de emisiones del vehículo, considerando la aproximación lo suficientemente buena.

Como se ha acaba de explicar, las emisiones de CO<sub>2</sub> del vehículo eléctrico van a verse muy influenciadas por la fuente de energía de la cual reciba la electricidad. Tal y como se mencionó, para la realización de este estudio se ha mantenido constante en el tiempo la variación del mix energético español hasta el año 2020. Si bien es cierto que esto no va a ser así, se consideran que las variaciones que vayan a surgir son poco relevantes. Esta conclusión también se obtiene de los estudios realizados por la Unión Europea [European10a].

En las siguientes figuras se pueden observar los valores del mix energético de la UE en los años 2010 y la previsión del 2020 [European10a].

### MIX EUROPEO 2010

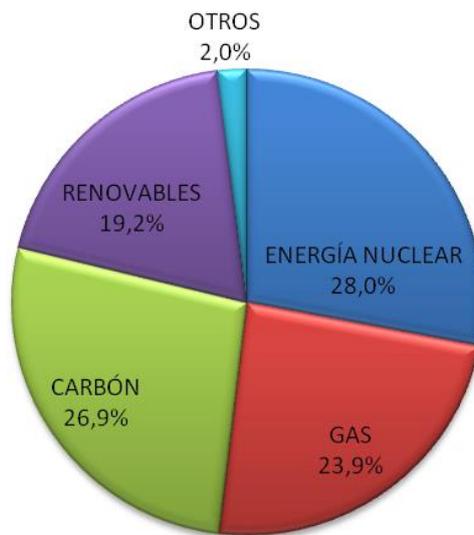


Figura 106: Mix eléctrico Europeo en el 2012 [European10a].

### PREVISIÓN MIX EUROPEO 2020

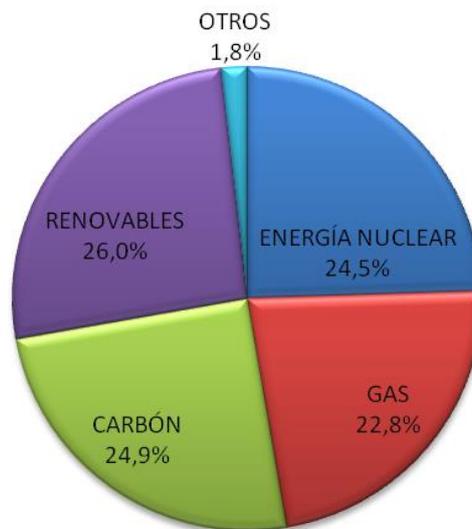


Figura 107: Previsión mix eléctrico Europeo en 2020 [Ree].

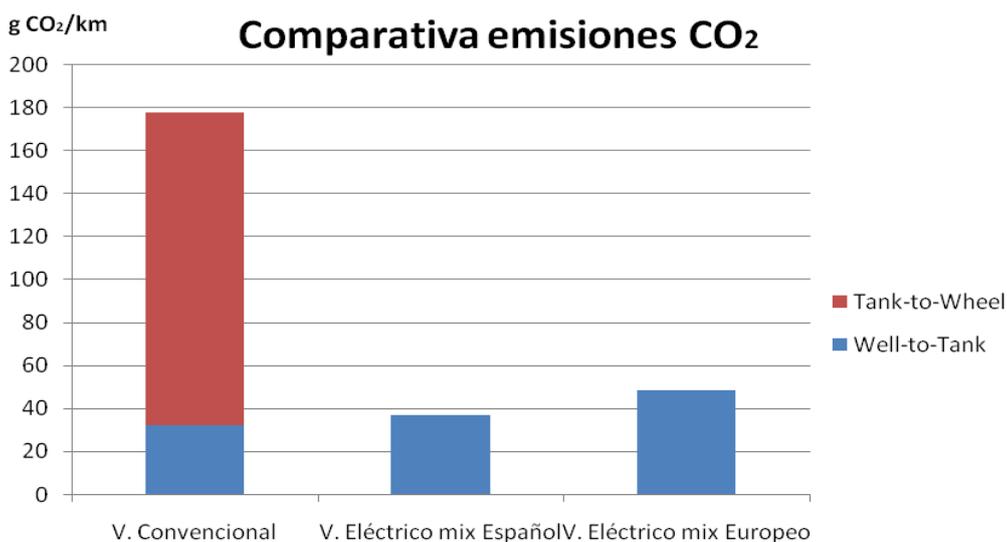
Si se compara el mix actual de generación europeo con el español, se ve claramente que en términos medioambientales, el mix español es mejor. El peso de las energías renovables en el mix español es muy superior al europeo, siendo el peso del carbón (el más contaminante) también muy inferior.

Si se analiza la previsión del mix europeo para el año 2020, se ve un aumento muy marcado de las energías renovables, pero el valor se encuentra aun lejos del actual valor del mix español. Según esto se puede decir que la previsión europea es de tender hacia un mix más similar al español, por lo que no se prevén grandes cambios en el mix español. El único caso en el que quizás podría variar el mix español para hacerse más similar al europeo sería en el caso de las energías nucleares, pero teniendo en cuenta que el estudio sólo abarca hasta el año 2020, es prácticamente impensable el construir más centrales nucleares en tan poco tiempo. Debido a esto, no se han incluido modificaciones en los pesos específicos de las distintas fuentes de energía a lo largo de la simulación.

### *Sub-bloque Tank-To-Wheel del vehículo eléctrico*

Obviamente, este sub-bloque no tiene modelo en concreto, puesto que como es conocido, el vehículo eléctrico en su utilización propiamente dicha no genera emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Por lo tanto no se ha considerado necesario incluir variable alguna. No obstante si se ha considerado interesante realizar algunas aclaraciones.

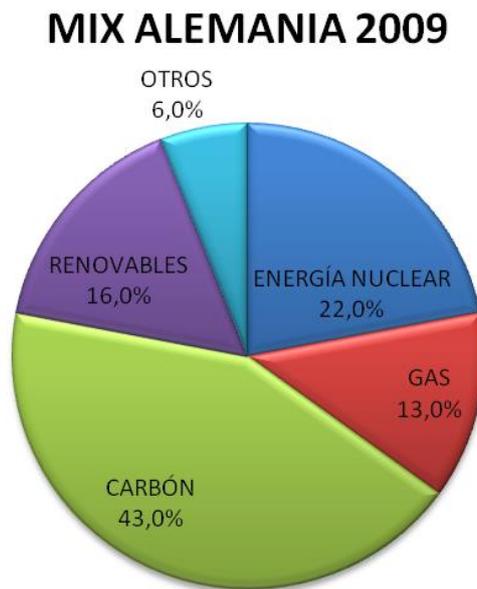
En la siguiente figura se puede observar una comparativa global de las emisiones de CO<sub>2</sub> entre el vehículo convencional y el vehículo eléctrico, este último con mix eléctrico español y con mix eléctrico europeo.



**Figura 108: Comparativa de emisiones de CO<sub>2</sub> entre un vehículo convencional y uno eléctrico con mix eléctrico español y europeo.**

Se puede ver en todos los casos cómo el vehículo eléctrico pese a tener más emisiones de CO<sub>2</sub> en la fase *Well-To-Tank*, al no tener emisiones en la fase de utilización por el consumidor, el balance final es muy favorable, incluso con un mix como el europeo más penalizante que en el caso del español. Esta misma conclusión se puede obtener de numerosos estudios realizados que corroboran estos resultados como son los de Van Vliet [Van Vliet11] o los de Campanari [Campanari09].

De la gráfica anterior se puede obtener dos conclusiones claras: las emisiones de CO<sub>2</sub> se van a ver reducidas con cualquier vehículo eléctrico respecto a los vehículos convencionales, y que el impacto medioambiental del vehículo eléctrico va a depender sustancialmente de la fuente de electricidad siendo factible que un vehículo eléctrico que circula por las calles españolas pueda generar menos emisiones de CO<sub>2</sub> en su ciclo completo *Well-To-Wheel* que ese mismo vehículo circulando por las calles alemanas debido a que el mix energético alemán es mucho más penalizante al tener una gran dependencia del carbón [Bickert11], [Granovskii06]. Para demostrar esto, en la siguiente figura se puede observar el mix energético alemán en el año 2009 [Bickert11].



**Figura 109: Mix eléctrico en Alemania en 2009 [Bickert11].**

En este caso, debido al importante peso relativo del carbón en el mix energético eléctrico, el balance de emisiones en la fase *Well-To-Tank* es más desfavorable. Se puede ver en la siguiente figura como las emisiones del mismo

vehículo eléctrico se pueden llegar casi a duplicar si circula en Alemania respecto a si circula en España.

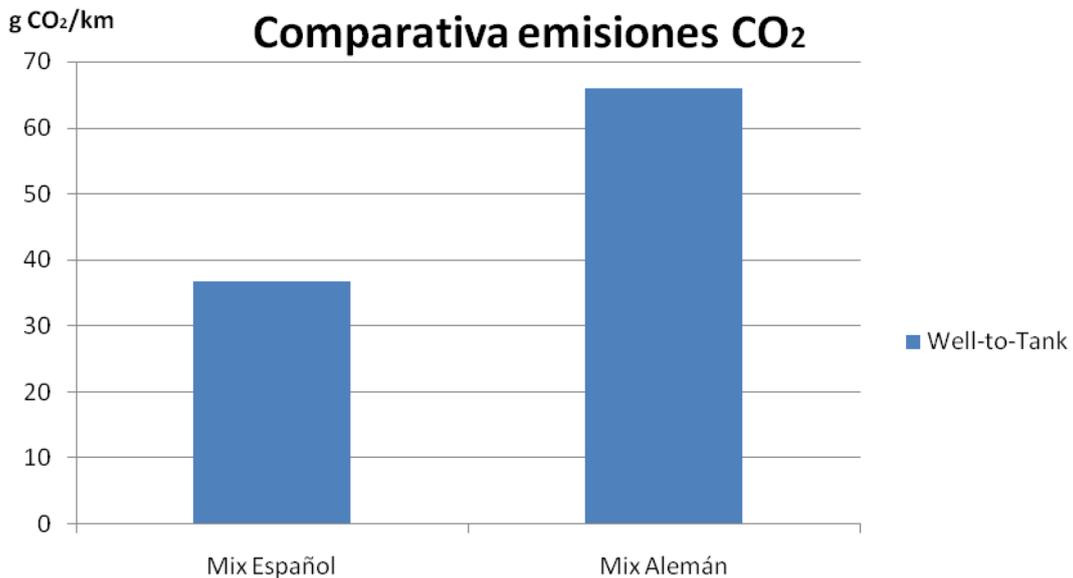


Figura 110: Comparativa de emisiones de CO<sub>2</sub> con el mix eléctrico español y el alemán.

### Sub-bloque CO<sub>2</sub> no emitido

Al relacionar todos los sub-bloques anteriores se podrá obtener el valor de las emisiones de CO<sub>2</sub> no emitidas a la atmósfera debido a la utilización del vehículo eléctrico en vez del convencional.

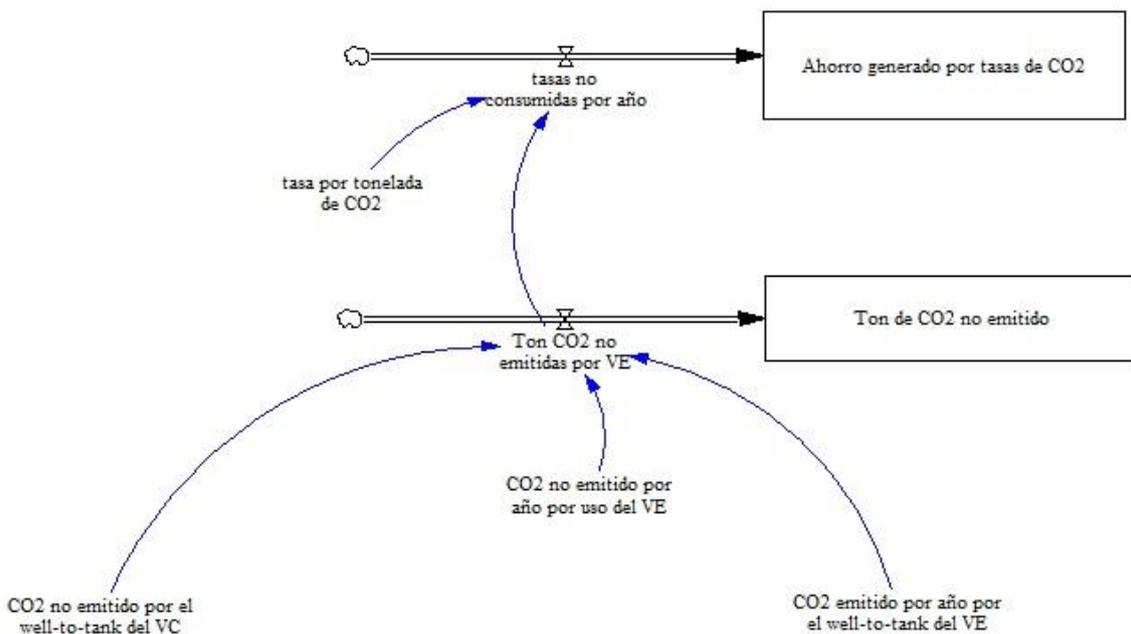


Figura 111: Modelo del cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> acumuladas.

Para el cálculo de las emisiones no emitidas, se tendrá que tener en cuenta las toneladas de CO<sub>2</sub> no emitidas debido al *Well-To-Tank* de los vehículos convencionales sustituidos por vehículos eléctricos, así como el *Tank-To-Wheel* de los mismos. Por contra, habrá que añadir unas emisiones que en el vehículo convencional no existen, que son las generadas durante el proceso de generación de la electricidad (*Well-To-Tank* del vehículo eléctrico).

Según esto, se han obtenido unos valores de toneladas de CO<sub>2</sub> no emitidas debido al vehículo eléctrico anualmente tal que:

*Ton CO2 no emitidas por VE=*

*CO2 no emitido por año por uso del VE+"CO2 no emitido por el Well-To-Tank del VC"- "CO2 emitido por año por el Well-To-Tank del VE"*

Este valor anual, será la entrada de un stock denominado “Ton de CO<sub>2</sub> no emitido”, en el que se irán acumulando las toneladas de CO<sub>2</sub> no emitidas gracias a la utilización del vehículo eléctrico.

Dicho valor anual también se va a emplear en el cálculo del ahorro económico que la no emisión de CO<sub>2</sub> implica. España, al emitir demasiado CO<sub>2</sub> a la atmósfera, se ve obligada a comprar derechos de emisión de CO<sub>2</sub> a otros países que les sobre para cumplir con el protocolo de Kyoto. Por citar un ejemplo, en Noviembre de 2009, España compró a Polonia derechos de emisión por un valor de 25 millones de euros. Para este cálculo, el valor necesario conocer es el del coste de las tasas de CO<sub>2</sub>. En la siguiente figura se puede ver la evolución que ha sufrido el precio de las tasas en el mercado intercontinental de compraventa de emisiones [Ice12].



Figura 112: Evolución de los precios de las tasas de emisión [Ice12].

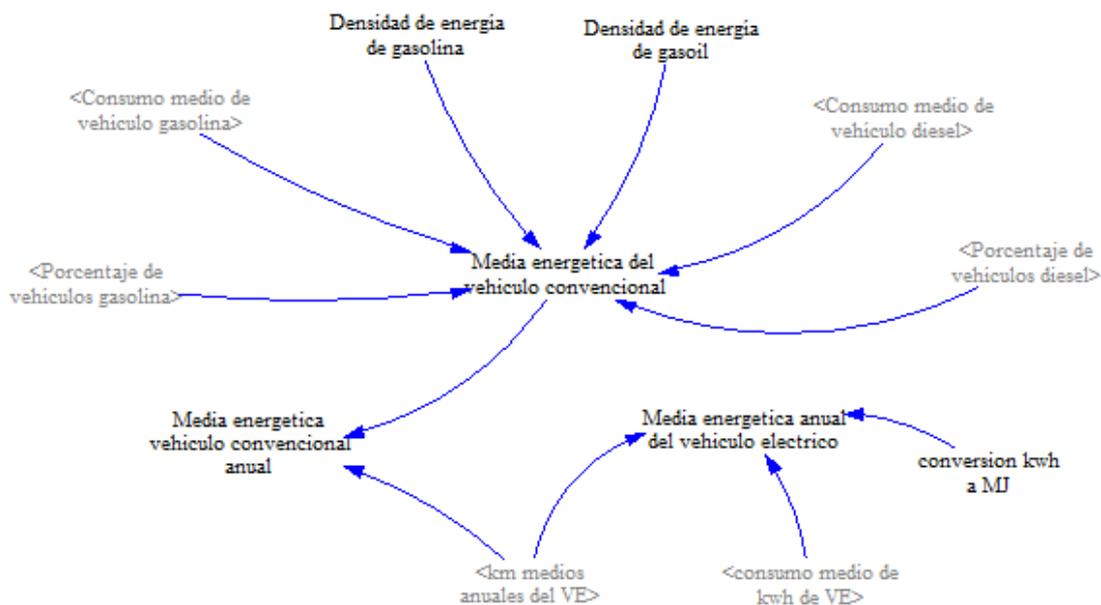
Se ve una clara variabilidad dependiendo del momento en que se compren los derechos de emisión por lo que determinar un valor o incluso una tendencia es tremendamente complejo. A este respecto, el impacto de la crisis económica sobre la industria está jugando un papel importante puesto que existe exceso de derechos de emisión en el conjunto de la Unión Europea, lo que implica una reducción del precio de venta como se observa en el gráfico.

Como se ha dicho, este dato es un valor muy fluctuante, por lo que se ha tomado un valor constante que no variará durante la simulación puesto que no afectará al resto de los resultados de la simulación, dado que no se realimenta en el modelo, y por ello es una variable meramente informativa. La referencia utilizada será de 7,5 euros/ton de CO<sub>2</sub> al ser el valor medio del año 2011, pero como he dicho es un valor puntual, ya que dependerá de numerosos factores [Ice12]. Se utiliza este valor para intentar determinar el ahorro económico que se puede llegar a obtener con el vehículo eléctrico en cuanto a emisiones de CO<sub>2</sub> se refiere.

Según esto, al multiplicar el precio de la tasa a pagar, por el ahorro de CO<sub>2</sub> se obtendrá el ahorro anual en tasas que España hubiera tenido que adquirir para cumplir el protocolo de Kyoto.

Por último, se ha creado un pequeño modelo acerca del consumo energético de ambos tipos de vehículos. Para ello, se va a comparar el consumo energético debido al funcionamiento de un vehículo convencional y un vehículo eléctrico, causado por los kilómetros recorridos anualmente. En este caso no se va a tener en cuenta el valor energético para obtener la energía necesaria para el movimiento del vehículo, sino que sólo se van a tratar diferencias energéticas en el consumo del combustible.

El modelo será el siguiente



**Figura 113: Modelo del consumo energético por el uso de ambos vehículos.**

El cálculo del consumo energético del vehículo eléctrico exclusivamente debido a su utilización es fácil de calcular teniendo en cuenta que el kWh en sí ya es una unidad de energía. Analizando el consumo energético de un vehículo eléctrico para realizar un kilómetro, y multiplicándolo por el total de kilómetros que recorre al año se obtiene dicho consumo energético, que al multiplicarlo por el factor de conversión de unidades (1 kWh = 3,6 MJ) se obtiene la energía consumida en Julios, valor comparable con la del vehículo convencional.

*Media energética anual del vehículo eléctrico=*

$$\text{consumo medio de kwh de VE} * \text{km medios anuales del VE} * \text{conversión kwh a MJ}$$

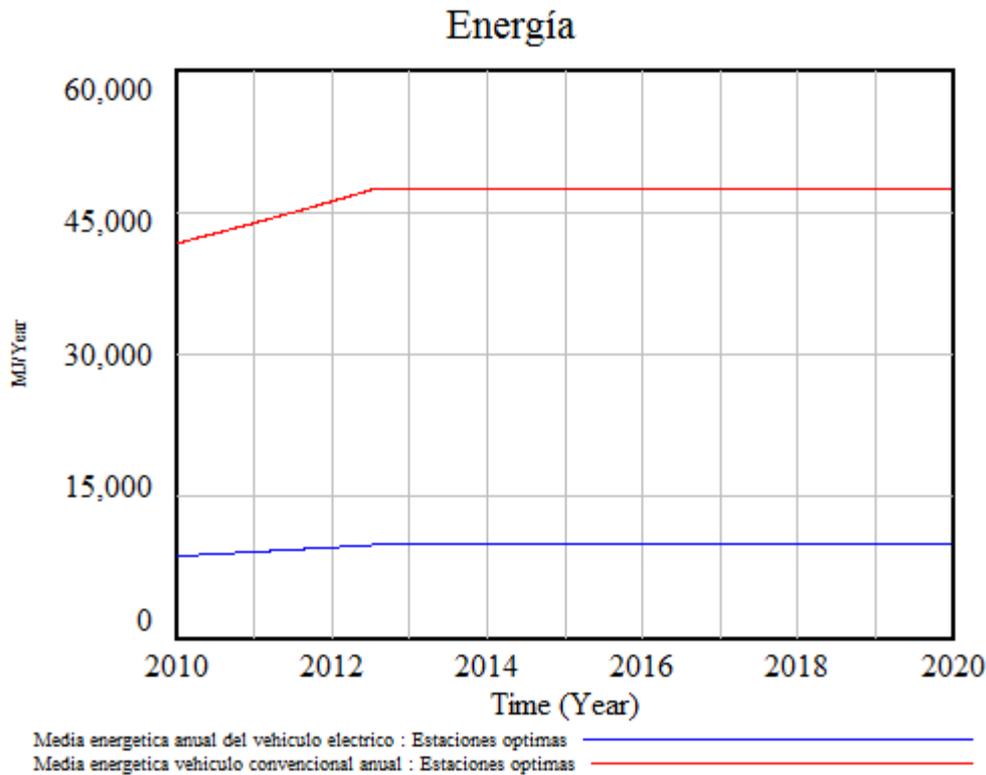
En cuanto al vehículo convencional, el método de cálculo es algo diferente. En este caso, el consumo energético se calcula atendiendo a la densidad de energía del combustible a utilizar anteriormente descritas. Se debe multiplicar este valor para cada tipo de combustible, con el consumo medio del vehículo convencional propulsado por este combustible, y por el porcentaje de este tipo de vehículos. De esta manera, se obtiene un valor medio de consumo energético para vehículos convencionales, independientemente de si su combustible es la gasolina o el gasoil. Para el caso de los motores de gasolina, el valor obtenido es de 2,375 MJ/km, el cual es un valor que corresponde perfectamente con los valores obtenidos en otros estudios similares [Eucar06].

*Media energética del vehículo convencional=*

*(Densidad de energía de gasoil\*Porcentaje de vehículos diesel\*Consumo medio de vehículo diesel)+(Densidad de energía de gasolina\*Porcentaje de vehículos gasolina\*Consumo medio de vehículo gasolina)*

Con esto se obtiene un valor en MJ por cada kilómetro a recorrer. Si este valor se multiplica por el número de kilómetros anuales recorridos, se obtiene el total del consumo energético anual debido al uso como tal del vehículo convencional, dato que es comparable al calculado para el vehículo eléctrico.

En la siguiente figura se puede ver una comparativa entre ambos consumos energéticos a igualdad de kilómetros recorridos anualmente.



**Figura 114: Comparativa entre consumos energéticos por el uso de los dos tipos de vehículos.**

Esta gran diferencia existente, se debe a la diferencia de eficiencias existentes entre los dos motores tratados, puesto que no se han tenido en cuenta más datos, como la energía necesaria para obtener la electricidad o la gasolina, etc.

Al igual que se ha realizado este estudio sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> del vehículo eléctrico en comparación con las del vehículo convencional, existen numerosos estudios a nivel Europeo e Internacional [Eucar06], [Granovskii06]. Los resultados de todos estos estudios, incluido este, son que las emisiones y el impacto medio ambiental de la movilidad eléctrica depende en gran medida de la manera de generar la electricidad que el vehículo eléctrico va a utilizar. Como se ha visto anteriormente, con electricidad generada por fuentes renovables, la movilidad eléctrica tiene una clara ventaja frente a los vehículos convencionales llegando a tener emisiones cercanas a cero. No obstante, con el actual mix de la generación eléctrica en España o incluso en la Unión Europea, la movilidad eléctrica puede ser muy ventajosa frente a los vehículos convencionales medioambientalmente hablando.

En líneas generales, aunque el vehículo eléctrico obtiene una reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub> debido a la no generación de emisiones durante su utilización debido a su motor eléctrico, existen emisiones generadas en la producción de la electricidad usada por el vehículo. Acorde a esto, existe un desplazamiento de emisiones, pero tal y como se ha mencionado anteriormente, el balance total de energía (*Well-To-Wheel*) aun indica una reducción muy significativa de emisiones de CO<sub>2</sub> [Thiel10].

## 5.8 Bloque de decisiones del Gobierno

En el último bloque se ha modelado las decisiones que el Gobierno va a tener en materia de subvenciones y el gasto que ello implica.

El diagrama es el siguiente:

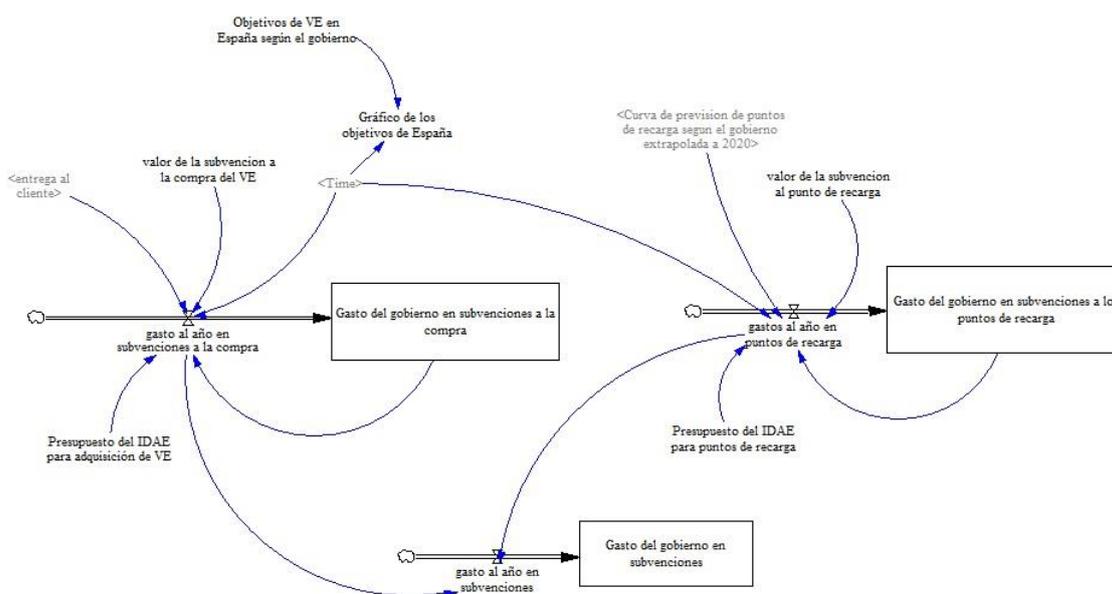
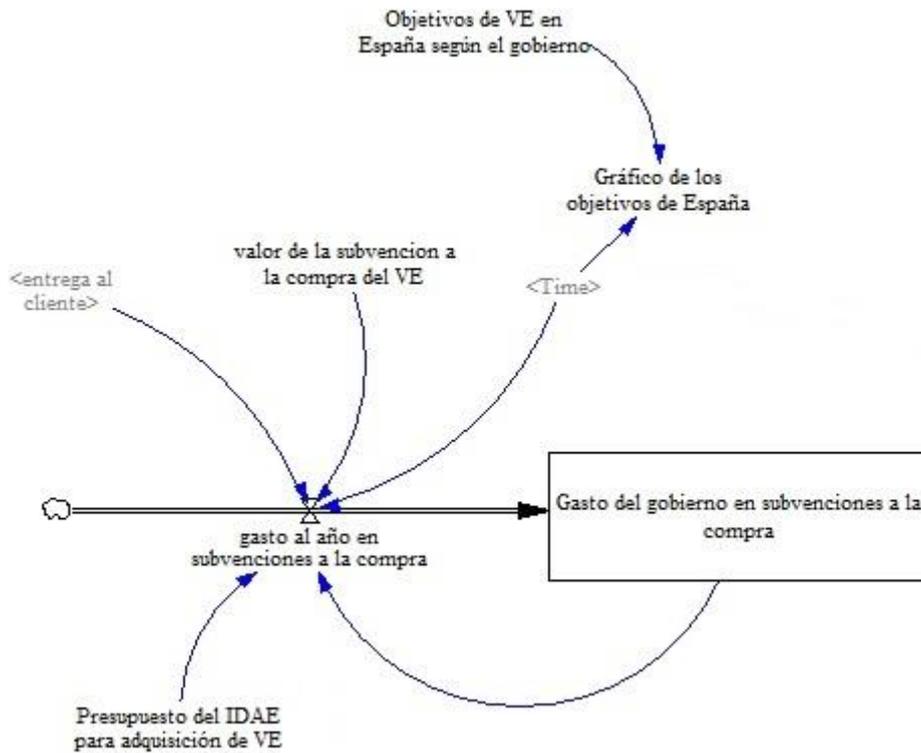


Figura 115: Modelo del bloque de las decisiones del Gobierno.

En este bloque se va a poder contabilizar tres stocks, que van a corresponder con el gasto que el Gobierno va a tener debido a los incentivos a la adquisición del vehículo eléctrico, el gasto en incentivos a la creación de puntos de recarga, y por último, el gasto total en incentivos.

El incentivo o subvención a la compra se ha modelado de la siguiente manera



**Figura 116: Modelo del gasto del Gobierno en subvenciones a la compra del vehículo eléctrico.**

Existe un flujo de entrada anual que va a estar compuesto por la relación entre el valor de la subvención existente en ese momento, el número de vehículos eléctricos que se han adquirido, el gasto que en ese momento ya lleva realizado el Gobierno, y por último, el presupuesto existente para este tipo de subvenciones.

Es decir, la compra se verá subvencionada con la cantidad fijada en la variable “valor de la subvención a la compra del VE”, siempre y cuando, el gasto del Gobierno no sea superior al presupuestado por el IDAE para la adquisición del vehículo eléctrico (8 millones de euros en 2009 y 2010, y 240 millones en 2011 y 2012 [Idae09b]). Pese a que en el inicio de la realización de este estudio la subvención máxima definida por el Gobierno para la adquisición de un vehículo eléctrico era de 7.000 euros [Idae09a], esta cuantía ha variado en la última revisión realizada en el año 2011. Según el Real Decreto 648/2011 por el que se regula la concesión directa de subvenciones para la adquisición de vehículos eléctricos durante 2011, en el marco del Plan de acción 2010-2012 del Plan integral de impulso al vehículo eléctrico en España 2010-2014, dependiendo del vehículo a adquirir y de su autonomía en modo de funcionamiento exclusivamente eléctrico (autonomía que da la capacidad de carga de las baterías), se establecen las

diferente cuantías individuales. Para el caso del estudio la cuantía de la subvención será del 25% del precio de venta antes de impuestos que conste en la factura, del vehículo completo incluidas sus baterías propulsoras siempre que no se superen 6.000 euros para aquellos vehículos con autonomía exclusivamente eléctrica superior a 90 km.

Según esto, para el caso del modelo base, se ha tomado como subvención a la compra 6.000 euros ya que será el valor limitador frente al 25% del valor de la compra que generalmente será superior a esos 6.000 euros.

En cuanto al valor del presupuesto, en el Real Decreto se determina que serán 72 millones de euros los destinados al año 2011, por lo que para el año 2012, en principio corresponderían 49 millones de euros según el Plan estratégico del Gobierno. No obstante, en el Real Decreto 417/2012, se modifica la cuantía del presupuesto asignado para la adquisición de vehículos eléctricos pasando a ser de 10 millones de euros. Para el año 2013, las ayudas se han prolongado en el tiempo con un presupuesto algo superior a los 9 millones de euros según lo descrito en el Real Decreto 294/2013. Lo que vaya a suceder a partir de esta fecha es una incógnita que no se solventará hasta que se determine el Plan de Acción 2012-2014 que a la fecha de la realización de este estudio está indefinido.

Según esto, la variable de entrada al stock será

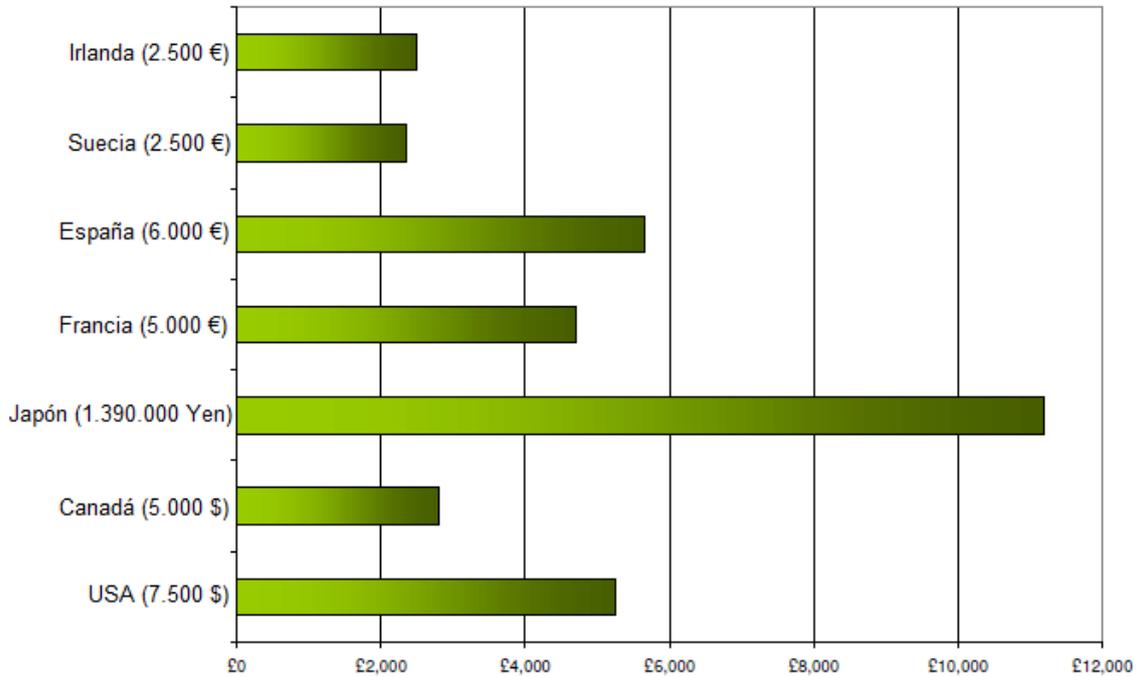
*gasto al año en subvenciones a la compra=*

*entrega al cliente\*IF THEN ELSE(Gasto del Gobierno en subvenciones a la compra <Presupuesto del IDAE para adquisición de VE, valor de la subvención a la compra del VE (Time),0)*

En la variable se puede ver la comparación entre el gasto realizado por el Gobierno, y el presupuesto fijado. En el caso de que el gasto sea menor que el presupuesto, se concederá la subvención, pero en el caso contrario, el Gobierno no aportará dinero alguno.

Este gasto anual en subvenciones a la compra, será la variable de entrada a un stock en el que se almacenará el total gastado por el Gobierno en este tipo de subvención.

Si se compara esta subvención con otros países, se puede ver cómo España se encuentra a la cabeza en cuanto a incentivos a la adquisición del vehículo eléctrico [Hazeldine09].



**Figura 117: Incentivos a la adquisición de vehículos eléctricos en diferentes países [Hazeldine09].**

Además, se ha creado una variable que refleja los objetivos del Gobierno, en cuanto al número de vehículos eléctricos que circulan por nuestras carreteras, valor que se ha modelado para poder hacer comparaciones de resultados y sacar conclusiones posteriormente. El dato sólo es conocido hasta el año 2014 [Industria10b]. El resto de años para la simulación se han estimado de manera lineal.

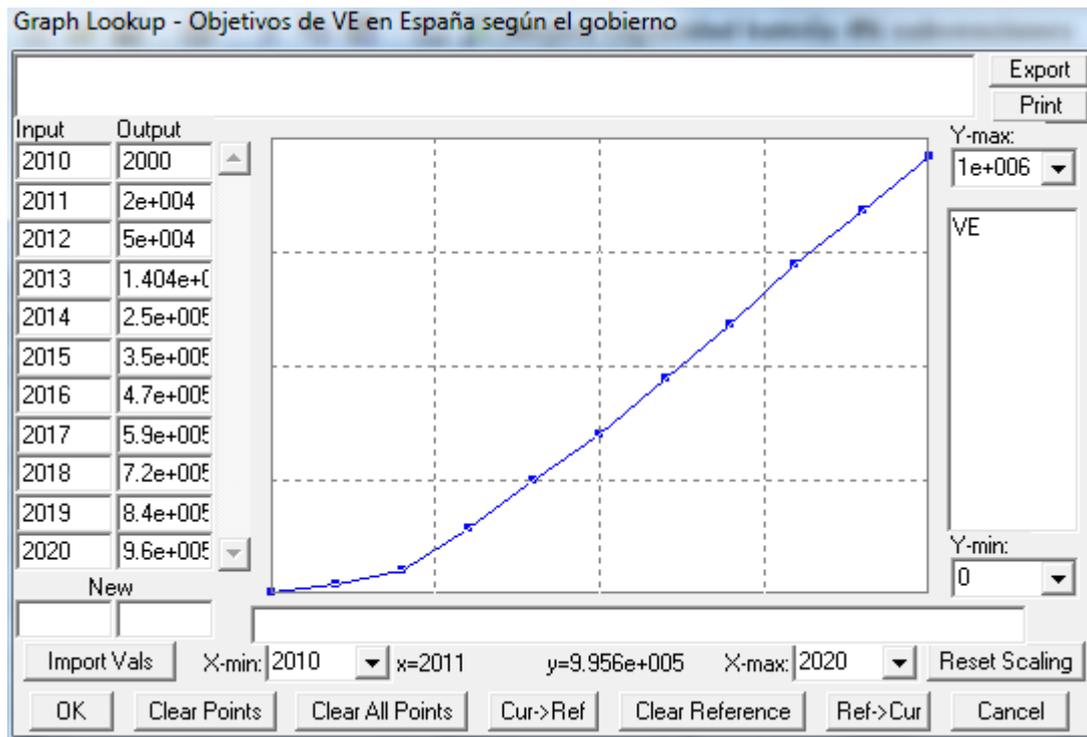


Figura 118: Curva de objetivos de vehículos eléctricos en España.

También hay que reflejar que estos valores son para vehículos eléctricos puros, y vehículos eléctricos “enchufables” (PHEV), pero en la actualidad no existen modelos comercializados de este tipo, por lo que no se consideran en el estudio.

En cuanto a las subvenciones a la creación de puntos de recarga, el método de modelado es idéntico a las subvenciones a la adquisición.

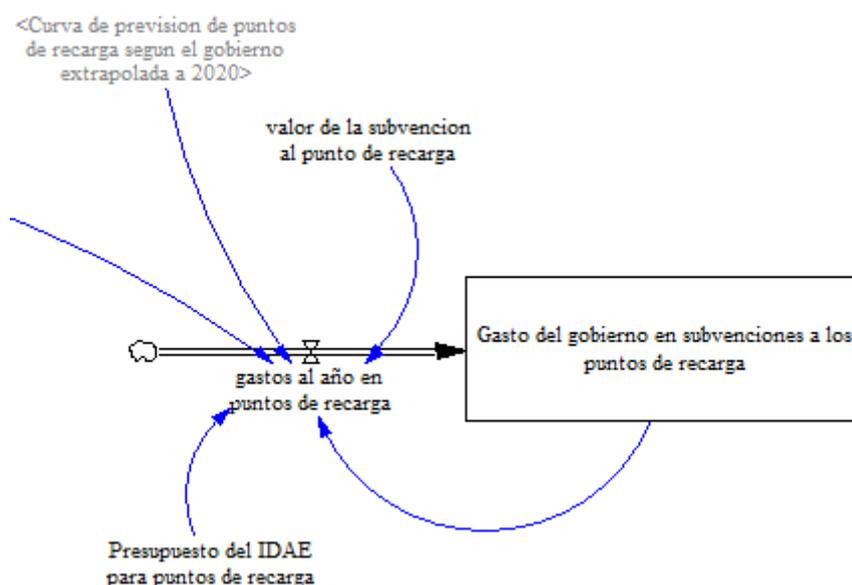


Figura 119: Modelo del gasto del Gobierno en subvenciones en puntos de recarga.

Existe un flujo de entrada anual que será la relación entre el valor de la subvención existente en ese momento a los puntos de recarga, el número de puntos de recarga instalados en ese momento, el gasto que hasta ese momento ya lleva realizado el Gobierno, y por último, el presupuesto existente para este tipo de subvenciones.

Es decir, la compra se verá subvencionada con la cantidad fijada en la variable “valor de la subvención al punto de recarga”, siempre y cuando, el gasto del Gobierno no sea superior al presupuestado por el IDAE para la implantación de puntos de recarga. Para el caso del modelo base, se ha tomado como subvención a la instalación del punto de recarga de 2.000 euros [Idae09b] que es la subvención media fijada en España.

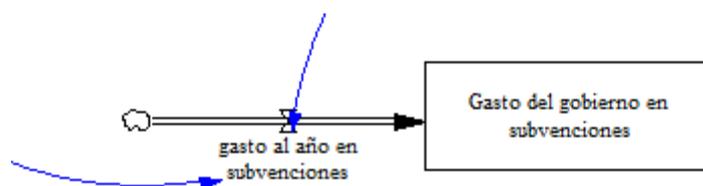
Según esto, la variable de entrada al stock será

*gastos al año en puntos de recarga=*

*IF THEN ELSE(Gasto del Gobierno en subvenciones a los puntos de recarga < Presupuesto del IDAE para puntos de recarga, Curva de previsión de puntos de recarga según el Gobierno extrapolada a 2020(Time)\*valor de la subvención al punto de recarga(Time),0)*

Al igual que sucedía con las subvenciones a la compra del vehículo eléctrico, este gasto anual en subvenciones a la implantación de puntos de recarga, será la variable de entrada a un stock en el que se almacenará el total gastado por el Gobierno en este tipo de subvención.

La suma de ambos flujos de entrada generará otro flujo de entrada de un tercer stock, el cual va a almacenar el gasto total que el Gobierno ha realizado en subvencionar el vehículo eléctrico, bien sea de manera directa a la compra, o bien sea con la instalación de puntos de recarga.



**Figura 120: Modelo del gasto total del Gobierno en subvenciones.**

Dentro de las subvenciones económicas, no se han considerado las subvenciones al fabricante de vehículos específicas por ser un vehículo eléctrico, puesto que para realizar un vehículo convencional ya se le está subvencionando, y el proceso de fabricación no difiere en tanta medida para considerar necesitar una subvención especial.

Además de los aspectos subvencionables, el Gobierno está representado en otros bloques mediante unas variables de control:

- Existencia de la tarifa supervalle.
- Gasto del Gobierno en publicidad.
- Fomento de la creación de estaciones de intercambio de baterías.

que tendrán un impacto importante en dichos bloques dependiendo de sus valores en el tiempo. Estos puntos también se encuentran dentro de las 15 medidas del Gobierno en su Plan de Acción 2010-2012.

A estos factores hay que añadir que las políticas del Gobierno en materia de implantación del vehículo eléctrico han variado notablemente. Hay que tener en cuenta que el modelo se ha realizado teniendo en cuenta unos planes del Gobierno. Sin embargo algunos documentos de intencionalidad política han quedado obsoletos como.

Por último, cabe destacar que en este bloque no se ha tenido en cuenta la realimentación del sistema en cuanto a ahorro económico se refiere derivado por las tasas de emisiones de CO<sub>2</sub> no adquiridas. El motivo es que la cuantía del presupuesto para el impulso del vehículo eléctrico en España es fija e independiente de las emisiones de CO<sub>2</sub> no emitidas finalmente. Si bien es cierto que esta reducción económica va a ser importante no va a tener una relación directa, o al menos en el espacio temporal que comprende este trabajo, que justifique su inclusión como realimentación en el modelo.



## Capítulo 6

# Modelo de motocicletas eléctricas

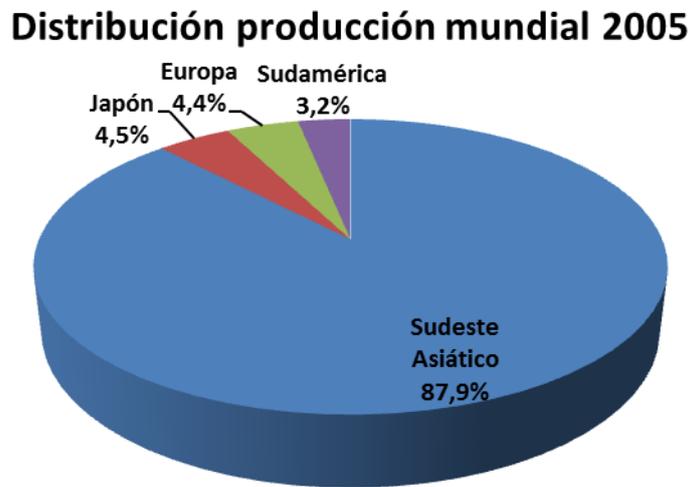
Se ha considerado necesaria la realización de una mención especial al campo de los ciclomotores (cilindradas hasta 50 cc) y las motocicletas (cilindradas superiores a 500c) debido a su aporte significativo a la evolución del mercado del vehículo eléctrico.

Hace algo más de una década, el mercado de las dos ruedas estaba en su punto álgido, viendo cómo se incrementaban sus ventas anualmente, logrando una cuota de mercado muy elevada en los mercados europeos y mundiales. En el periodo comprendido entre el año 1995 y 2005 se dobló la producción pasando de 20 millones a 40 millones de unidades fabricadas [Anesdor07] motivado principalmente por el incremento de la demanda en China, India y otros países del Sudeste Asiático.



**Figura 121: Evolución de la producción mundial de motocicletas [Anesdor07]**

El desarrollo de los denominados países con economías emergentes trajo consigo una alteración significativa en el panorama productivo a nivel mundial, concentrando la producción en torno a una serie de países en los que destacan China, India y Tailandia.



**Figura 122: Distribución de la producción mundial de motocicletas [Anesdor07]**

Esto provocó la entrada de nuevas empresas atraídas por las oportunidades de negocio, especialmente en los mercados emergentes, donde los estándares de calidad requeridos por administraciones y usuarios no son tan elevados. En los mercados más maduros, como Europa y Estados Unidos, la presencia de las marcas muy consolidadas constituye una barrera a la entrada de nuevos competidores.

Lógicamente, en Europa se produjo una caída en los niveles de producción que se fueron desplazando hacia Asia. El ejemplo más significativo es el de Italia donde el número de motocicletas fabricadas paso de 1,1 millones de unidades en el año 2000 a 700.000 en el año 2005. Francia y España sufrieron procesos similares. No obstante, a partir del año 2002 y 2003, la producción de ambos países se recuperó, sobre todo en España con un considerable incremento que le permitió consolidarse como segundo fabricante europeo con un total de 250.000 unidades en 2005.

La tendencia que se observó en los países del sudeste asiático en el periodo comprendido entre el 2001 y el año 2005 se ha seguido observando en los años actuales. La producción ha seguido creciendo en estos países y alcanzando valores próximos a los 50 millones de unidades en los años 2007 y 2008. No obstante, el efecto de la crisis económica global también se ha notado allí, descendiendo el número de ventas principalmente en países como Japón [Jama12].

Especialmente significativo es el caso de China. El gigante asiático ha aumentado su producción en más de seis millones en tan sólo dos años. Este hecho viene provocado por dos factores: sus costes productivos notablemente inferiores al de otras economías y una fuerte demanda interior para este tipo de vehículos. China produce más de la mitad de las motocicletas del mundo con más de 27 millones unidades. Son sus propias marcas las que dominan el mercado local siguiendo modelos similares a los japoneses pero con menor calidad.

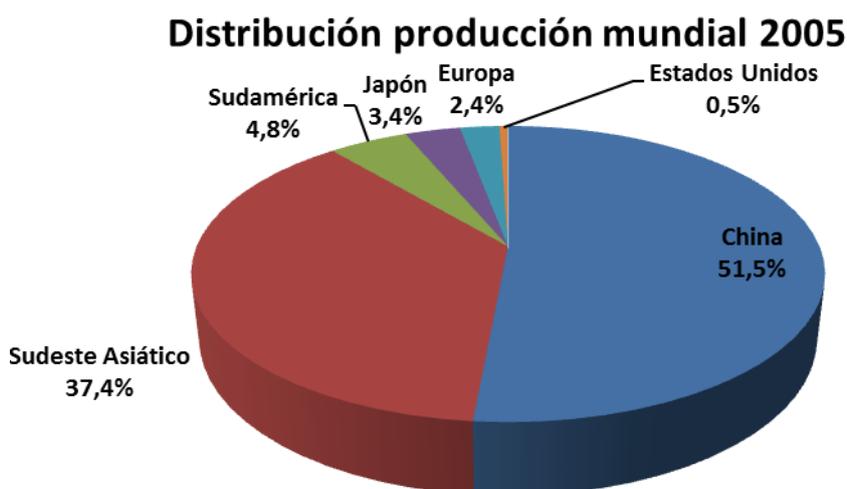


Figura 123: Distribución de la producción mundial de motocicletas [Manzano11]

Al analizar con más detalle este país, se puede observar cómo ha evolucionado también el mercado de las motocicletas eléctricas en los últimos años. Desde el año 2001 la venta de motocicletas eléctricas ha tenido un aumento claramente exponencial en el país asiático, equiparándose a los valores de las motocicletas convencionales en muy pocos años.

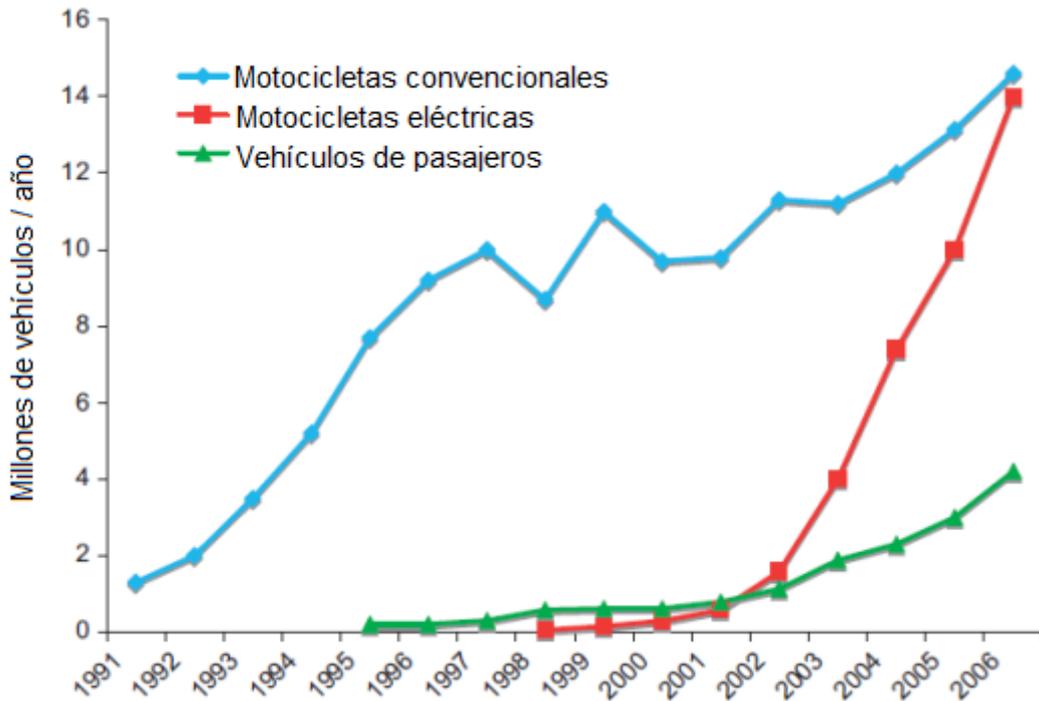


Figura 124: Venta de vehículos motorizados en China [Weinert08].

En Europa, la producción comenzó a descender desde el año 2006 situándose en 2009 por debajo del millón de unidades [Acem13] y con una tendencia en recesión hasta la actualidad.

## Producción europea

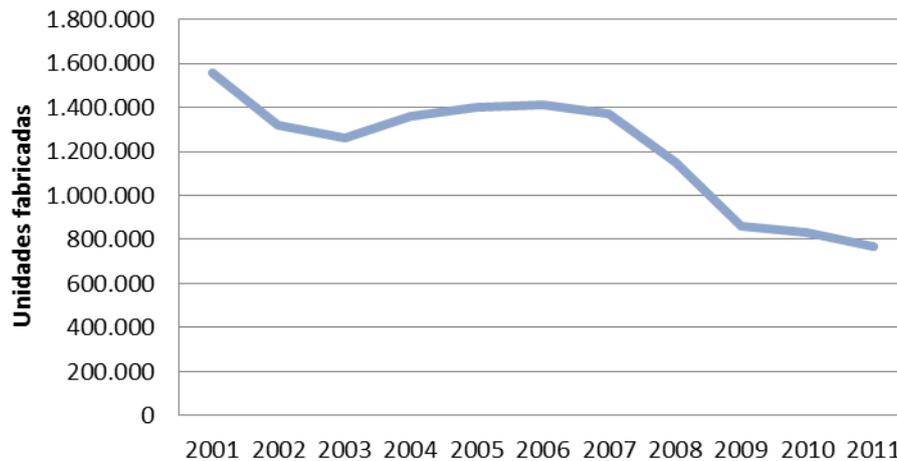


Figura 125: Producción europea de motocicletas [Acem13].

Entrando al detalle de los principales países productores europeos, la recesión se ha hecho notar principalmente en Italia y España en el año 2008 como se puede ver en el siguiente gráfico teniendo una ruptura muy marcada de la tendencia existente.

## Producción por país

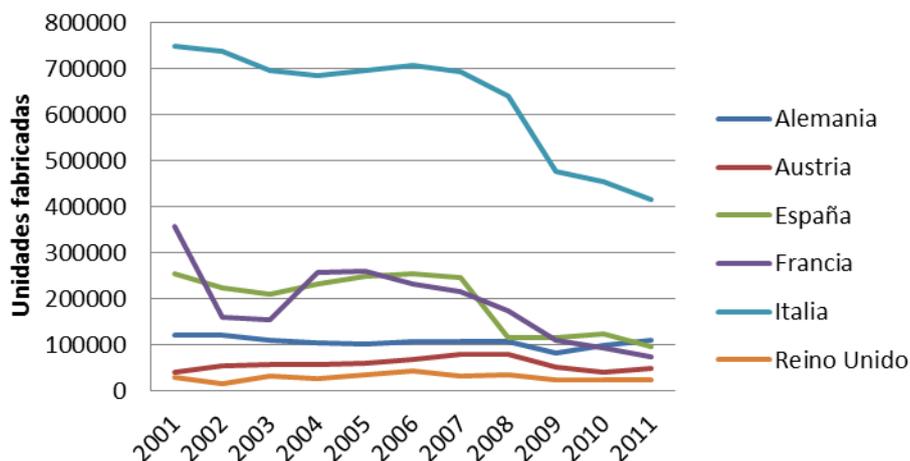


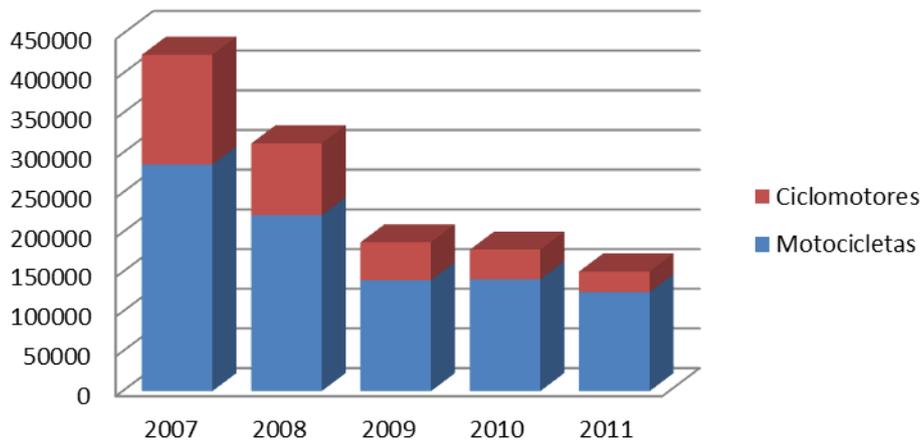
Figura 126: Producción europea de motocicletas por país [Acem13].

Las razones hay que buscarlas en la competencia de estas economías y el notable descenso de la demanda. En el caso español, la producción descendió hasta la mitad en un sólo año, de las 245.000 unidades de 2007 se pasó sólo a 115.000 en 2008. En 2009 Honda efectuó el cierre de su factoría en Cataluña siendo seguida por Piaggio y Yamaha en 2011.

El número de matriculaciones y la producción de las marcas han disminuido considerablemente en el mercado europeo, americano y japonés, los más afectados por la crisis. La situación actual acelera el desplazamiento de ventas hacia mercados hasta ahora secundarios ante la primacía de la zona occidental.

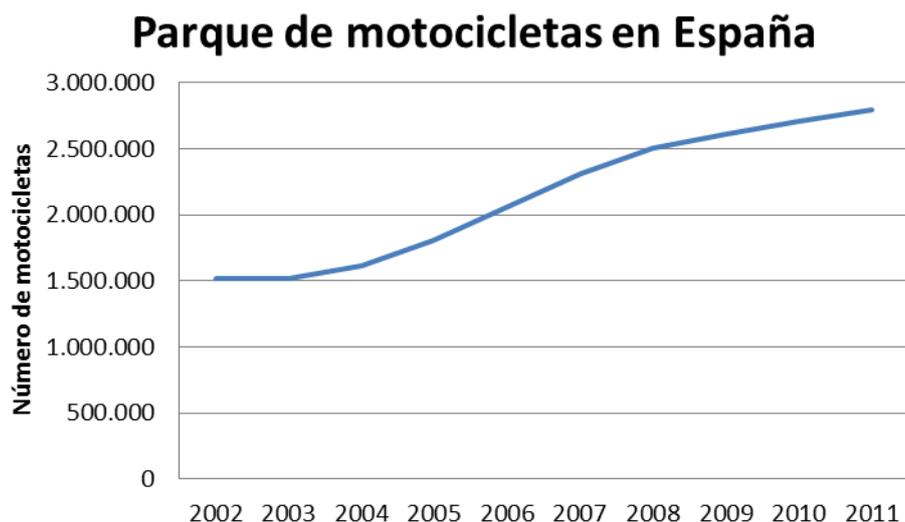
Centrando la exposición en España, ha sido el país europeo en donde el descenso de la demanda se ha notado en mayor medida. En el año 2007, las ventas de motocicletas fueron de 285.663, pasando a 125.059 en el año 2011 suponiendo un descenso de más del 50%. En el caso del ciclomotor la reducción es más importante aun pasando de un valor de 138.295 unidades vendidas en 2007 a 25.782 en el año 2011 siendo una reducción de más del 80% de las ventas desde el comienzo de la crisis económica.

### Matriculaciones en España



**Figura 127: Evolución de las matriculaciones en España de motocicletas [Dgt11].**

A pesar del notable descenso de las matriculaciones en España, la realidad es que el parque de motocicletas del país no ha descendido, sino todo lo contrario, ha ido aumentando como se observa en la siguiente gráfica [Dgt11].



**Figura 128: Evolución del parque de motocicletas en España [Dgt11].**

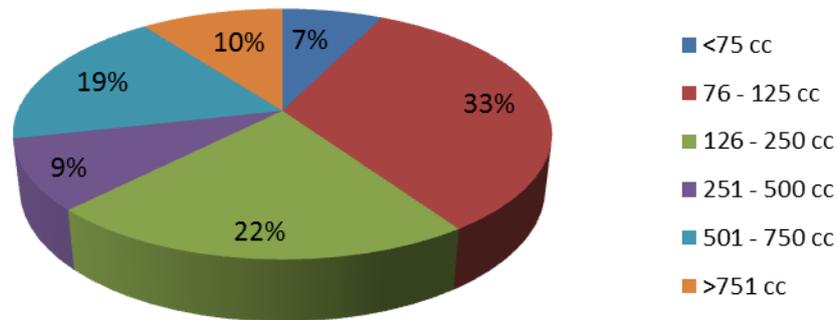
Hasta la crisis económica, el parque aumentaba a un ritmo superior al 10% anual (12% en el 2005, 14% en el 2006, etc). Sin embargo, a partir del año 2008 el crecimiento se ha reducido drásticamente, pasando a valores cercanos al 3% para los años sucesivos (3,3% en el año 2011). Esto indica que el parque de motocicletas español no se está renovando, sino que está envejeciendo.

## 6.1 Modelo general de las motocicletas

Para la creación del modelo en Dinámica de Sistemas de las motocicletas, sea tomado como base el ya creado para el vehículo eléctrico, realizando las modificaciones oportunas, pero manteniendo la misma estructura e incluso aprovechando bastantes variables importantes e independientes del tipo de vehículo. Debido a esto, el modelo va a ser notablemente inferior en cuanto a volumen de variables y lazos.

Lo primero que se ha realizado es segmentar el sector de motocicletas que el cliente va a estar interesado en adquirir. El consumidor español se declina por motocicletas con una cilindrada pequeña y más teniendo en cuenta el efecto de la crisis principalmente en aquellos compradores que antes optaban por cilindradas superiores. El cliente busca resolver sus necesidades de movilidad a menor precio. Como se puede ver en la siguiente gráfica, el parque de motocicletas en España está compuesto principalmente por motocicletas de baja y media cilindrada.

## Segmentación en España por cilindradas 2011



**Figura 129: Segmentación de las motocicletas en España por cilindrada [Dgt11].**

Una vez entendida la situación de los vehículos de dos ruedas en España, se puede comenzar a analizar las posibilidades de la motocicleta eléctrica en el mercado español.

Lo primero es determinar qué es para el Gobierno de España una motocicleta eléctrica. En España el Proyecto Movele según el Boletín Oficial del Estado Núm. 160 Sec. III. del 03 de julio de 2009, tal y como se ha mencionado anteriormente tenía destinado un presupuesto a ayudas a la compra de vehículos eléctricos. En el caso de las motocicletas estas ayudas variaban entre los 750€ y los 1.200€ según la curva de eficiencia energética del vehículo, pero siempre que estuvieran en la categoría L3e según la Directiva 2002/24/CE del Parlamento Europeo y del Consejo. Dicha categoría comprende los vehículos de dos ruedas sin sidecar con un motor cuya cilindrada sea superior a 50 cc. para los motores de combustión interna y/o con una velocidad máxima por construcción superior a 45 km/h. Según esto, los ciclomotores al ser categoría L1e, se vieron fuera de este plan de ayudas y por tanto del plan del Gobierno.

Atendiendo a estas directrices, los datos existentes en la actualidad suministrados por las diversas agencias automovilísticas sobre venta de motocicletas eléctricas son un tanto confusos ya que, ciertos ciclomotores como son los de las marcas Yadea y Gewer están incluidos en estas estadísticas, pero no en lo recogido por el Gobierno.

Una vez definida la motocicleta eléctrica, se puede acotar a que grupo de cliente potencial se puede dirigir con lo que se va reduciendo las posibilidades de implantación. Teniendo en cuenta la segmentación de cilindradas de España, el estudio se ha centrado exclusivamente en las motocicletas con una cilindrada inferior a los 250 cc., puesto que suponen más del 50% de la población española y es donde existe una variedad de motocicletas eléctricas como para suponer un nuevo producto en el mercado con una cierta competencia.

Según todo lo explicado, para los datos medios de las motocicletas convencionales se va a trabajar con 3 grupos:

- Motocicletas con cilindrada inferior a 75 cc. que corresponde con el 7%.
- Motocicletas con cilindrada inferior a 125 cc. y superior a 75 cc., que corresponde con el 33%.
- Motocicletas con cilindrada inferior a 250 cc. y superior a 125 cc., que corresponde con el 22%.

Estos grupos servirán para obtener todos los valores medios de las motocicletas convencionales en cuanto a costes, consumos, etc. El total de la población estudiada será del 62%.

En cuanto a las motocicletas eléctricas, teniendo en cuenta que la variedad es muy inferior se han mantenido únicamente dos grupos para los datos estadísticos:

- Motocicletas eléctricas con cilindrada inferior a 125 cc.
- Motocicletas eléctricas con cilindrada superior a 125 cc.

La decisión de la creación de grupos estadísticos está originada por la gran diferencia de prestaciones y precios entre las motocicletas existentes atendiendo a las cilindradas.

Según esto, el modelo general de la motocicleta eléctrica va a ser de la siguiente manera:

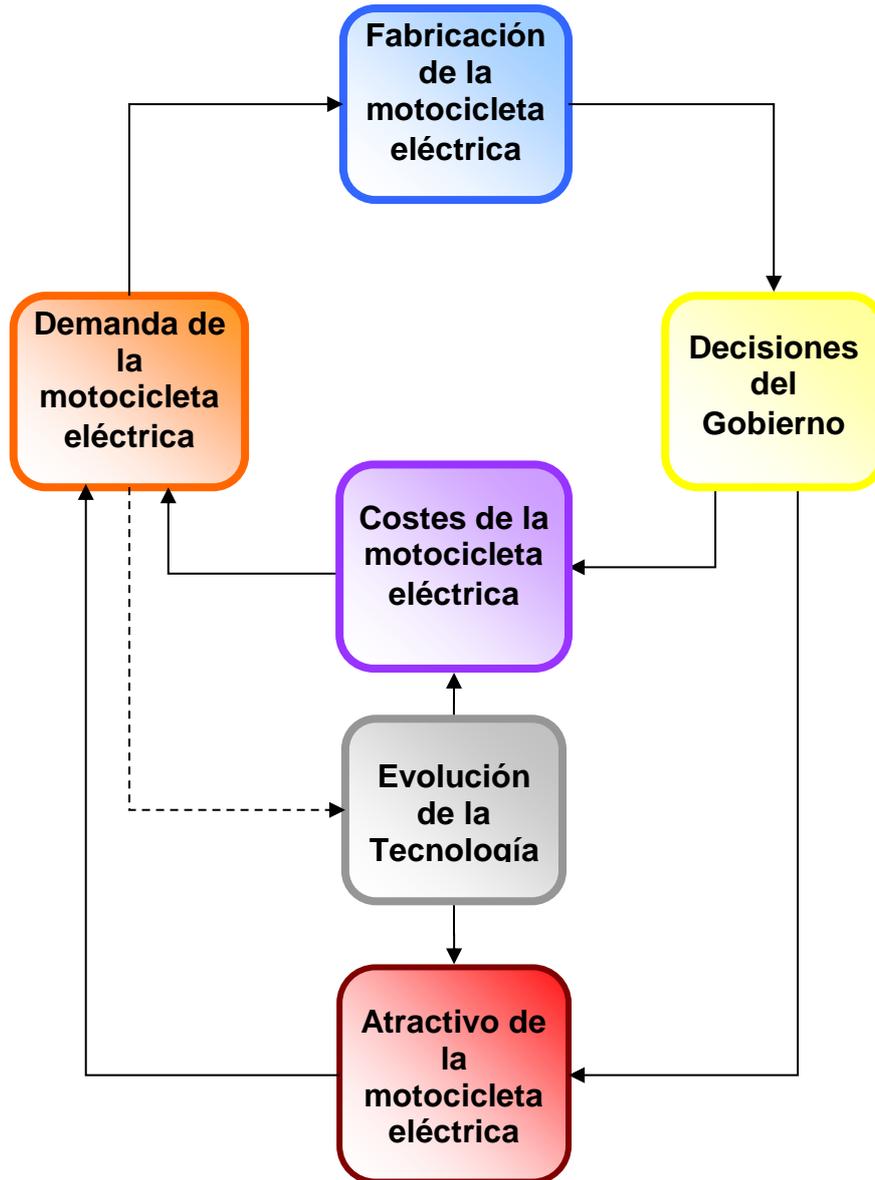
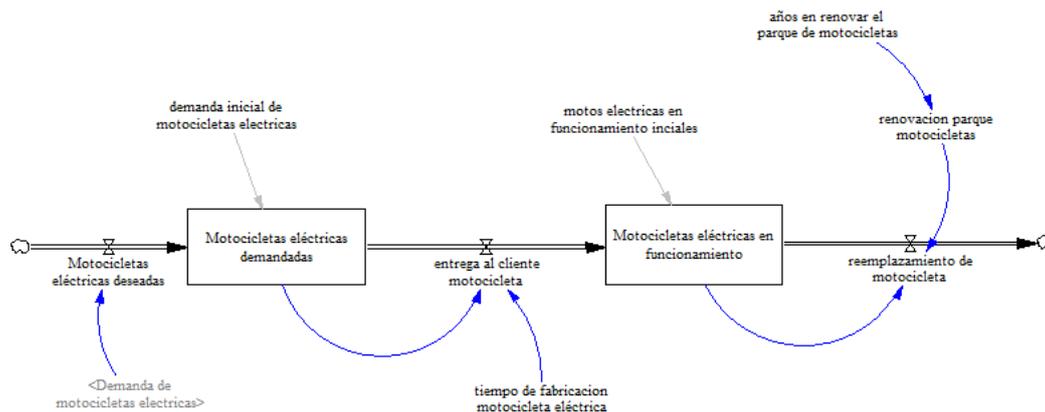


Figura 130: Modelo general de la motocicleta.

## 6.2 Bloque de fabricación de la motocicleta eléctrica

Al igual que ocurría en el vehículo eléctrico, se comienza la explicación por el final del proceso, es decir, con la fabricación de las motocicletas eléctricas puesto que únicamente posee una variable de entrada externa que es la demanda de motocicletas eléctricas, la cual se genera en otro bloque del sistema general que se verá posteriormente.

En la siguiente figura se puede ver el modelado del bloque completo:



**Figura 131: Modelo del bloque de fabricación de la motocicleta eléctrica.**

Al igual que sucedía con el vehículo eléctrico, el modelo se compone de dos stocks, uno de las motocicletas eléctricas que se han demandado, y otro de las motocicletas eléctricas que van a estar en funcionamiento en la actualidad de cada año.

La variable de entrada al bloque es la demanda de motocicletas eléctricas que actuará como flujo de entrada del primer stock. Inicialmente, se ha asumido una demanda de motocicletas eléctricas para el inicio de 2010 de cero al igual que se realizó con el vehículo eléctrico.

Como sucedía en el modelo de los vehículos eléctricos, las motocicletas eléctricas no permanecerán en el primer stock durante mucho tiempo. Únicamente el tiempo que transcurre entre que el cliente solicita el vehículo eléctrico al concesionario, y éste lo tramita y se fabrica. Este tiempo es enormemente variable y dependerá de factores muy diversos como el fabricante, el lugar de procedencia, etc., pero se estima un tiempo de aproximadamente dos meses, que es lo que en el modelo se ha denominado “tiempo de fabricación motocicleta eléctrica”. Una vez ha transcurrido este tiempo, se considera que la motocicleta eléctrica ha sido entregada al cliente por lo que ha dejado de estar demandada, es decir, abandona el stock de motocicletas eléctricas demandadas para pasar a formar parte del stock de motocicletas eléctricas en funcionamiento.

Para el stock de motocicletas eléctricas en funcionamiento, se han considerado unas condiciones iniciales idénticas al stock anterior, es decir, en el inicio de 2010 no se ha considerado la existencia de motocicleta eléctrica alguna.

Al igual que sucedía en el modelo del vehículo eléctrico, se ha decidido que el stock de motocicletas eléctricas en funcionamiento posea una salida a pesar del periodo temporal de la simulación que hace pensar que en principio no deberían ser reemplazados. Esta salida va a incluir el cierto grado de renovación que puedan tener: pueden darse circunstancias tales como que la motocicleta eléctrica se estropee y sea reemplazada, que sufra algún percance como un accidente, etc.

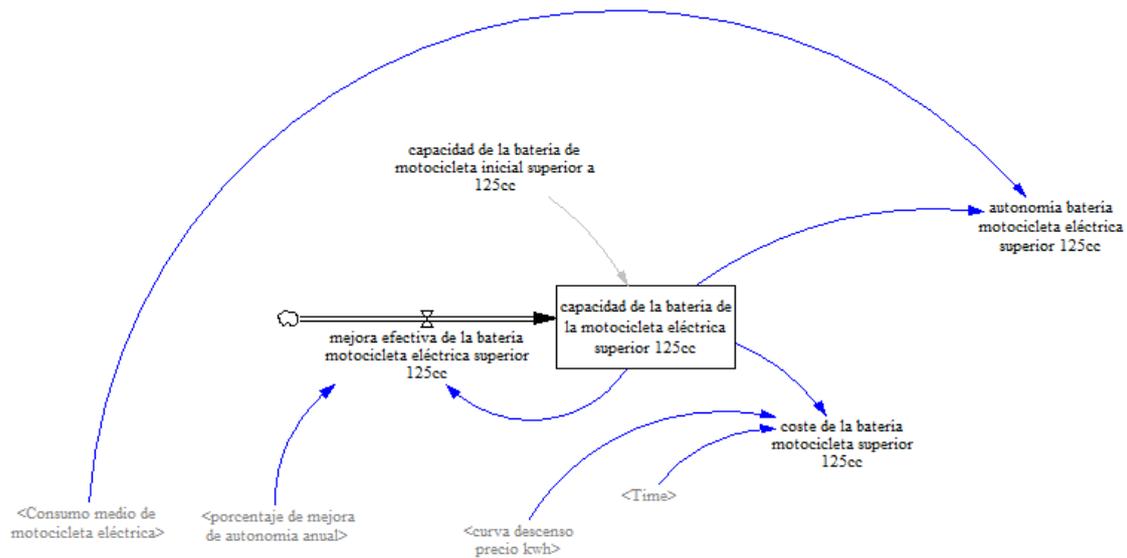
Para modelar este reemplazamiento se ha tenido en cuenta el número de motocicletas eléctricas existentes en cada momento así como el grado de renovación existente en el parque de motocicletas. Para este dato se ha fijado el valor de 10 años como media. Esto es debido al tipo de motocicletas estudiadas y a que como se vio anteriormente, a pesar de que las ventas de motocicletas han disminuido drásticamente, el parque no lo ha hecho sino todo lo contrario, ha continuado creciendo lo que implica que el cliente tarda más tiempo en renovar su motocicleta.

### **6.3 Bloque de evolución de las tecnologías**

La base general de este bloque es la utilizada en el mismo bloque para los vehículos eléctricos, puesto que, por ejemplo las evoluciones que se prevén para las baterías van a ser independientes de si la batería es portada por un vehículo o una motocicleta.

Existen dos stocks que irán contabilizando el aumento en la capacidad de la batería en los dos grupos estadísticos de motocicletas eléctricas que se vaya consiguiendo con los avances tecnológicos existentes. Se ha partido de una capacidad inicial de la batería, basada en la capacidad media existente en la actualidad.

Para entender mejor el modelo se explicará solamente sobre un grupo estadístico, como se puede ver en la figura siguiente:



**Figura 132: Modelo de la evolución de la capacidad de la batería.**

Se ha tomado como ejemplo el stock para el cálculo de la capacidad de la batería de la motocicleta eléctrica con cilindrada superior a 125 cc.

En el stock se parte de una capacidad inicial de la batería que se verá incrementada de manera anual debido a los diversos avances que se esperan en el campo de las baterías como se vieron anteriormente. Al igual que se hizo en los vehículos eléctricos se ha tomado un valor de un 2% de mejoría anual de la capacidad de la batería [Bandivadekar08] que está incluido en la variable “porcentaje de mejora de autonomía anual”.

Al igual que ocurría en el caso del vehículo eléctrico, se ha determinado el utilizar como unidades de los stocks la capacidad de las baterías y no las densidades de potencia ni de energía por idénticos motivos.

En el caso de la motocicleta eléctrica con cilindrada superior a 125 cc. el valor de la capacidad inicial de la batería se ha considerado 6 kWh. Se ha tomado como base para estas motocicletas la denominada Zero ZF6 [Zero] al ser una de las pocas de esta cilindrada que se ha vendido en España.

Según esto, el modelo es sencillo, puesto que está compuesto de un único stock que se irá incrementando a medida que pasan los años como consecuencia de las

mejoras de las tecnologías de las baterías que se explicaron anteriormente para los vehículos eléctricos.

*mejora efectiva de la batería motocicleta eléctrica superior 125cc=*

*capacidad de la batería de la motocicleta eléctrica superior 125cc\*porcentaje de mejora de autonomía anual*

Una vez obtenida la evolución de la capacidad de la batería en el tiempo, para obtener el coste de dicha batería en el tiempo bastará con multiplicar dicho valor por el precio del kWh que se estima en cada momento temporal. Para ello, se ha tomado el mismo valor de coste calculado del kWh para los vehículos eléctricos puesto que como ya se ha explicado, la evolución de esta tecnología va a ser independiente del vehículo en el que se utilice.

*coste de la batería motocicleta superior 125cc=*

*capacidad de la batería de la motocicleta eléctrica superior 125cc\*curva descenso precio kwh(Time)*

Es importante resaltar que para las motocicletas eléctricas sólo se ha considerado las baterías de litio puesto que, si bien es cierto que al inicio de su venta existían varios tipos de baterías (Vectrix VX1 utilizaba batería de Níquel-MH, la Kytoto Edison batería de Plomo-Ácido, etc.) la clara tendencia es a utilizar baterías de litio desapareciendo el resto de tipos.

En cuanto a la autonomía que la batería va a proporcionar, su cálculo va a ser sencillo, atendiendo al consumo medio de una motocicleta eléctrica.

*autonomía batería motocicleta eléctrica superior 125cc=*

*capacidad de la batería de la motocicleta eléctrica superior 125cc/Consumo medio de motocicleta eléctrica*

Para esto se ha tomado el dato estadístico de 4 kWh por cada 100 kilómetros atendiendo a la media de las motocicletas eléctricas que más se han vendido en España (la motocicleta Zero ZF6 consume 3,75 kWh mientras que la motocicleta Vectrix VX1

Li 4,6 kWh). En este caso, como consumo inicial en este tipo de motocicleta el valor será de 6 kWh / 4 kWh (cada 100 km) resultando una autonomía de 150 km.

En la siguiente tabla se encuentran la capacidad de las baterías y sus autonomías asociadas de algunas de las motocicletas eléctricas con cilindrada superior a 125 cc. más significativas del mercado español

<b>NOMBRE</b>	<b>BATERÍA</b>	<b>AUTONOMÍA</b>	<b>CONSUMO</b>
<b>Vectrix VX1 Li</b>	3,7 kWh	80 km	4,6 kWh/100 km
<b>Vectrix VX1 Li+</b>	5,4 kWh	120 km	4,5 kWh/100 km
<b>Vectrix VX2</b>	2,8 kWh	80 km	3,5 kWh/100 km
<b>ZERO ZF6</b>	6 kWh	160 km	3,75 kWh/100 km

**Tabla 16: Capacidad de la batería, autonomía y consumo de las principales motocicletas eléctricas de más de 125 cc. en el mercado español.**

Al tener un consumo tan bajo las motocicletas eléctricas, no se ha considerado mejora de eficiencia de los motores ni mejoras aerodinámicas tal y como se hizo con los vehículos eléctricos puesto que la reducción del consumo sería tan pequeña que se puede considerar despreciable.

El esquema para las motocicletas eléctricas con una cilindrada inferior a los 125 cc. es análogo al que se acaba de explicar, pero se parte de otros datos iniciales. La capacidad inicial de la batería será de 3,7 kWh habiendo utilizado como dato la de la motocicleta Vectrix VX1 Li [Vectrix]. En este caso, como consumo inicial en este tipo de motocicleta el valor será de 3,7 kWh / 4 kWh (cada 100 km) resultando una autonomía de 92 km.

Una vez obtenidos los valores de capacidad de la batería, coste de la batería y autonomía para los dos grupos estadísticos de motocicletas eléctricas, es necesario realizar el cálculo de normalización para obtener un valor medio para la motocicleta eléctrica.

Para ello, se deben utilizar los datos de segmentación de cilindradas en el parque de motocicletas español. Según esto, los valores medios serán:

*capacidad de la batería de motocicleta media=*

*((capacidad de la batería de la motocicleta eléctrica inferior 125cc\*(*"Porcentaje población de motocicletas <125cc"*+*"Porcentaje población de motocicletas <75cc"*))+capacidad de la batería de la motocicleta eléctrica superior 125cc\**"Porcentaje población de motocicletas <250cc"*))/Porcentaje de población de motocicletas estudiadas*

*autonomía batería motocicleta eléctrica media=*

*((autonomía batería motocicleta eléctrica inferior 125cc\*(*"Porcentaje población de motocicletas <125cc"*+*"Porcentaje población de motocicletas <75cc"*))+autonomía batería motocicleta eléctrica superior 125cc\**"Porcentaje población de motocicletas <250cc"*))/Porcentaje de población de motocicletas estudiadas*

*coste de la batería en motocicleta eléctrica medio=*

*((coste de la batería motocicleta inferior 125cc\*(*"Porcentaje población de motocicletas <125cc"*+*"Porcentaje población de motocicletas <75cc"*))+coste de la batería motocicleta superior 125cc\**"Porcentaje población de motocicletas <250cc"*))/Porcentaje de población de motocicletas estudiadas*

Para los cálculos se ha multiplicado el valor obtenido en cada apartado por el porcentaje de población que corresponda al grupo de estudio, y se ha dividido el resultado total entre el porcentaje de población total estudiado. De esta manera se pretende obtener un valor medio para la motocicleta eléctrica lo más realista posible.

En el caso de las motocicletas eléctricas no se ha contemplado la vida útil de las baterías puesto que, como se vio en los casos estudiados para los vehículos eléctricos, los valores con los que se han trabajado superan ampliamente las necesidades de utilización que se van a tener. En este caso, al partir de una autonomía inicial de 110 kilómetros de manera media para una batería de 2.200 ciclos posibles [Graham01], se obtendrían unos kilómetros posibles a recorrer en la vida de la motocicleta de más de 200.000, lo que supera ampliamente las previsiones para este tipo de motocicletas.

## 6.4 Bloque del coste de la motocicleta eléctrica

Al igual que sucedió en el vehículo eléctrico, en este bloque se ha pretendido analizar los costes de la motocicleta eléctrica y los costes de la motocicleta convencional, tanto en el momento de la compra por parte del cliente, como durante la vida útil. Para ello, se han tenido en cuenta datos como la evolución de los precios del petróleo y de la electricidad, costes de mantenimiento, etc. Análogamente se va a utilizar el TCO (*Total Cost of Ownership*).

Este bloque también se ha dividido para una mejor comprensión en 4 sub-bloques: el coste de la motocicleta eléctrica en el momento de la compra, el coste de la motocicleta eléctrica por su utilización, el coste de la motocicleta convencional en el momento de la compra, y el coste de la motocicleta convencional durante su uso. En la figura se puede ver un sinóptico del funcionamiento general del bloque.

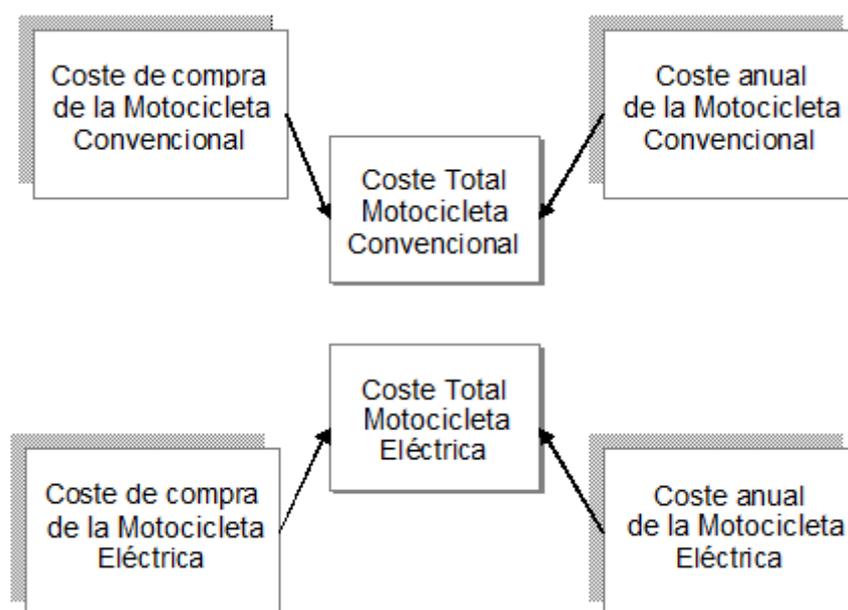


Figura 133: Sub-bloques principales del modelo de costes de la motocicleta eléctrica.

### *Sub-bloque de Coste de compra de la motocicleta convencional*

El sub-bloque más simple es el correspondiente al coste de la adquisición de la motocicleta convencional por parte del cliente, puesto que es una única variable con el coste medio de las motocicletas de combustión interna existentes en la actualidad.

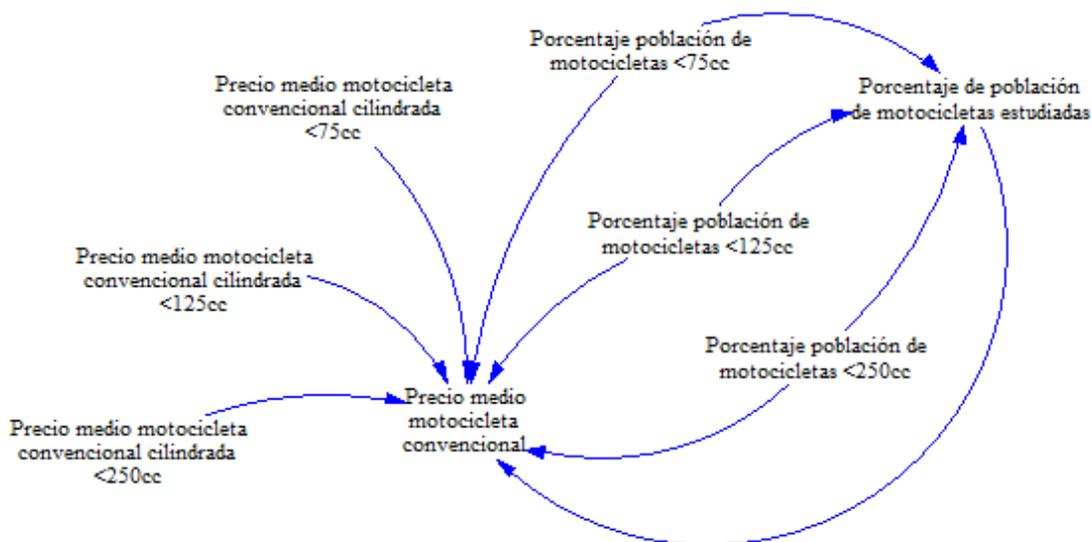


Figura 134: Modelo del sub-bloque de costes de adquisición de la motocicleta convencional.

El valor de referencia utilizado se ha calculado en función de los tres grupos estadísticos creados anteriormente. Según esto se ha determinado un valor de referencia para cada grupo y se ha referenciado a la población de cada grupo para obtener el valor medio. Las siguientes motocicletas son las que se han tomado como referencia de coste de adquisición para cada sector.

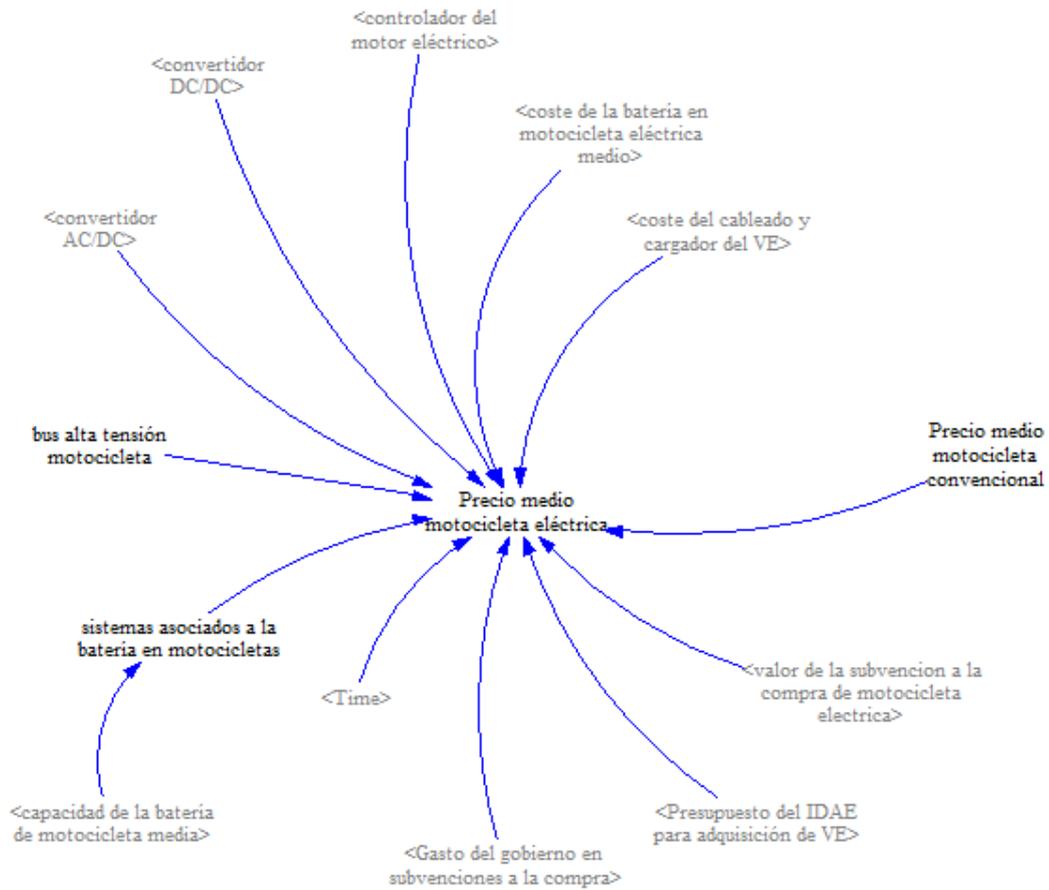
NOMBRE	CILINDRADA	PRECIO
<b>Aprilia Sportcity One</b>	Inferior a 75cc	2.499 €
<b>HONDA S-Wing 125 ABS</b>	Entre 75cc y 125cc	4.249 €
<b>Peugeot Geopolis 400 Executive ABS</b>	Superior a 125cc	5.999 €

Tabla 17: Precios de las motocicletas convencionales tomadas como referencia.

Si bien es cierto que son valores de referencia, esto no implica que todas las motocicletas de dichas cilindradas vayan a tener ese valor. De hecho, los precios que las motocicletas puedan tener a lo largo del tiempo pueden variar debido a descuentos, épocas del año, etc. Puesto que estas variaciones son muy difíciles de simular y no se consideran que aporten demasiado valor cualitativo al modelo final se ha decidido mantener estos precios medios constantes.

### *Sub-bloque de Coste de compra de la motocicleta eléctrica*

A partir de este primer sub-bloque, se puede construir el sub-bloque del precio de compra de una motocicleta eléctrica. En la figura se puede observar este sub-bloque.



**Figura 135: Modelo del sub-bloque del coste de compra de la motocicleta eléctrica.**

Al igual que sucedía en el vehículo eléctrico, la motocicleta eléctrica utiliza muchos de los mismos tipos de sistemas y componentes que una motocicleta convencional, y por supuesto, compartirá muchas características inherentes al vehículo eléctrico.

Partiendo de los datos anteriormente explicados para el caso del vehículo eléctrico, rápidamente se pueden determinar los sobrecostos en la adquisición de una motocicleta eléctrica frente a una convencional. Según esto, los conceptos incluidos también en el vehículo eléctrico son:

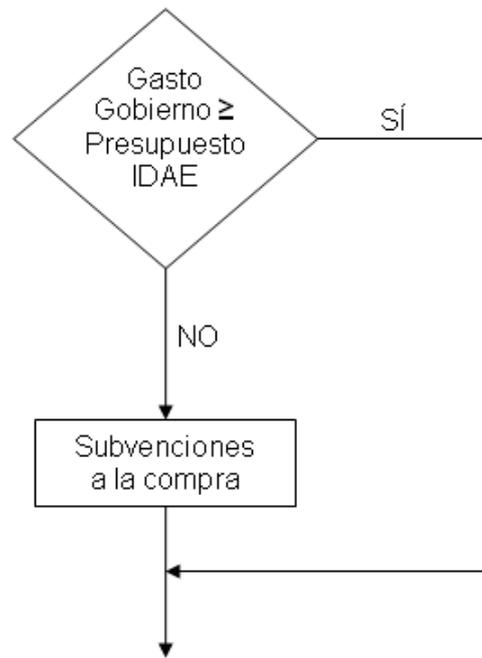
- Convertidor AC/DC.
- Convertidor DC/DC.
- Controlador del motor eléctrico.
- Bus de alta tensión.
- Sistemas asociados a la batería (bandeja de sujeción, sistema de control térmico, etc).
- Cableado y cargador de la motocicleta eléctrica.

Estos conceptos no se van a volver a explicar puesto que fueron detallados en el capítulo de costes del vehículo eléctrico, pero en el modelo sí que se añaden sus costes.

Por último, el factor más relevante económicamente hablando de la motocicleta eléctrica frente a la convencional va a ser el coste de las baterías al igual que sucedía en el vehículo eléctrico. Para estos datos se han utilizado los trabajos de Kromer y Heywood [Kromer07], Kalhammer [Kalhammer07], Duvall [Duvall04] y Kurani [Kurani13] al igual que ocurría en el vehículo eléctrico puesto que la evolución de esta tecnología va a ser independiente del tipo de vehículo que porte la batería.

Como último factor a considerar dentro del precio de compra de la motocicleta eléctrico, son los incentivos económicos que el Gobierno pueda dar el momento determinado de la compra. Para éste cálculo, se utilizan tres variables relacionadas entre sí: el valor del propio incentivo o subvención, el presupuesto que el IDAE tiene para gastar en subvenciones para la adquisición de vehículos eléctricos [Idae09b], y por último, el dinero que ya se lleva gastado en subvenciones.

Al igual que sucedía en el vehículo eléctrico, el valor de la subvención existente en cada momento sólo será descontado del precio de compra, en el caso de que aun quede dinero presupuestado a tal efecto. Según esto, en el modelo se ha realizado una comparación entre el dinero gastado por el Gobierno en subvenciones y el presupuesto existente. En el caso de que el dinero gastado sea inferior al presupuesto, la subvención a la compra se efectuará. En el caso de que el dinero gastado sea superior o igual al presupuesto, no se concederá subvención alguna. Este funcionamiento se puede observar en el siguiente diagrama de flujo.



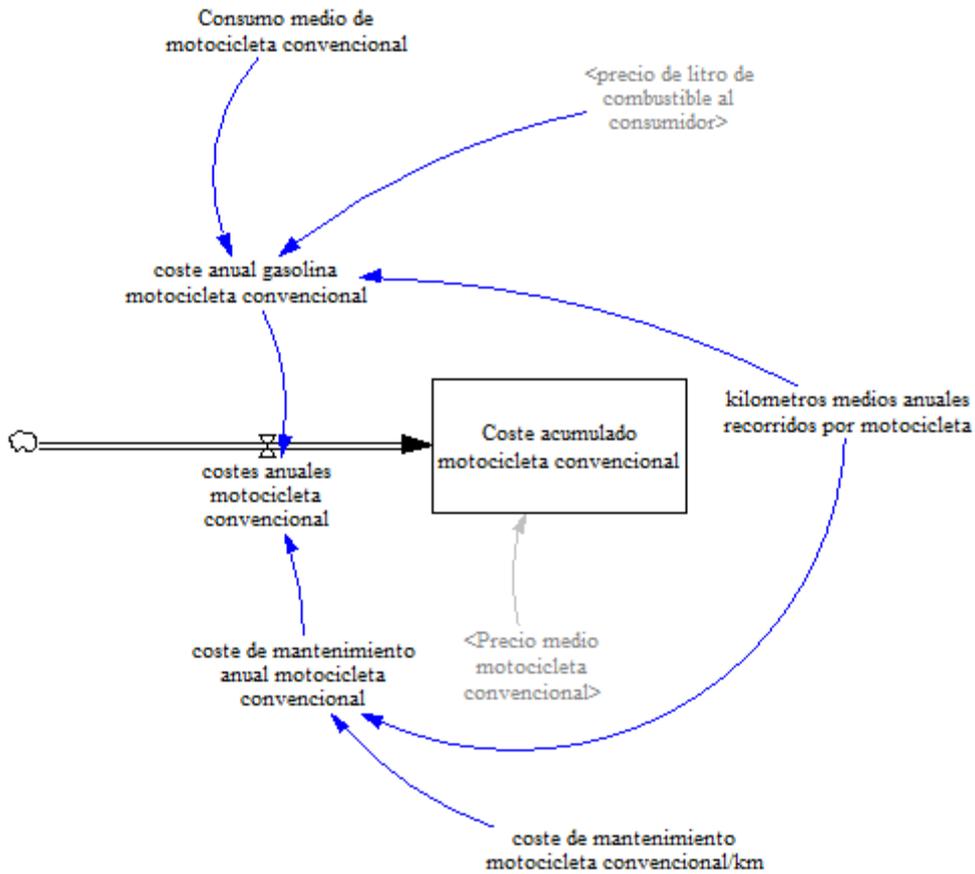
**Figura 136: Diagrama de flujo para la existencia de subvenciones.**

Con todos los valores anteriormente calculados, se obtiene el precio medio de la compra de una motocicleta eléctrica.

#### ***Sub-bloque de Coste anual de la motocicleta convencional***

El siguiente sub-bloque a estudiar es el correspondiente al coste de la motocicleta convencional a lo largo de su vida útil, debido a su utilización.

En este sub-bloque van a existir dos conceptos principales que son el coste anual que la motocicleta va a tener debido al consumo de combustible y el coste de mantenimiento que va a tener. En la figura siguiente se muestra dicho sub-bloque.



**Figura 137: Modelo del sub-bloque de coste anual de la motocicleta convencional.**

En cuanto al consumo de combustible de la motocicleta, el cálculo se basa en el precio del litro de la gasolina obtenido para el vehículo convencional multiplicado por el consumo medio que tiene una motocicleta y por los kilómetros medios que recorre una motocicleta al año. Dentro de este precio de la gasolina se incluyen las previsiones de fluctuación del precio que se determinaron anteriormente.

La motocicleta convencional va a tener como combustible la gasolina en casi la totalidad del parque ya que las motocicletas diesel son prácticamente inexistentes. Como dato, en el año 2006 existían 2.055.459 motocicletas con combustible gasolina para 2.024 diesel, es decir, el 99,9% de las motocicletas utilizaban gasolina, por lo que se desprecian para el estudio las motocicletas diesel.

*coste anual gasolina motocicleta convencional=*

*kilómetros medios anuales recorridos por motocicleta\*precio de litro de combustible al consumidor\*Consumo medio de motocicleta convencional*

Para el consumo medio de la motocicleta convencional se ha utilizado una media de las motocicletas estudiadas:

<b>NOMBRE</b>	<b>CONSUMO (l/100 km)</b>
<b>Aprilia Sportcity One</b>	4
<b>Honda S-Wing 125 ABS</b>	3,5
<b>Peugeot Satelis 125 Urban ABS</b>	3,8
<b>Peugeot Geopolis 400 Executive ABS</b>	4,1
<b>Suzuki Sixteen 125</b>	4

**Tabla 18: Consumo de las motocicletas convencionales tomadas como referencia.**

En base a esto, el valor utilizado es de 3,8 litros de combustible por cada 100 kilómetros recorridos por la motocicleta.

En cuanto a los kilómetros recorridos anualmente de media por una motocicleta el dato utilizado es de 9.000. Este dato será común para motocicletas convencionales como eléctricas, y ha sido determinado en base a los estudios de la compañía fabricante de motocicletas eléctricas LEMev [Lemev]. En ellos indican que de media se recorren 50 kilómetros al día con una media de utilización de 180 días al año.

No se ha considerado reducción alguna del consumo de los motores de combustión como se hizo en los vehículos convencionales puesto que el consumo es tan bajo que esta reducción en valor numérico sería prácticamente inapreciable.

Según lo comentado al inicio del sub-bloque, únicamente falta por calcular los costes de mantenimiento que la motocicleta convencional va a tener de manera anual que van a representar una porción significativa del presupuesto de funcionamiento. Para ello se ha estimado el coste de mantenimiento que una motocicleta convencional tiene a lo largo de su vida útil, y se ha relativizado al número de kilómetros que realiza hasta

que se reemplaza. Según esto, el valor obtenido es de 0,0283 € por cada kilómetro recorrido [García-Valdecasas08]. En estos mantenimientos están incluidos servicios tales como cambios de aceite y otros líquidos de servicio, reparación o reemplazo de transmisiones, piezas de motor, etc. como se puede ver en la siguiente tabla.

MANTENIMIENTO	COSTE POR 100KM MOTO. CONVENCIONAL
Aceite	1 €
Bujías	0,5 €
Filtro de aire	0,5 €
Filtro de aceite	0,5 €
Batería	0,33 €
Total/km	0,0283 €

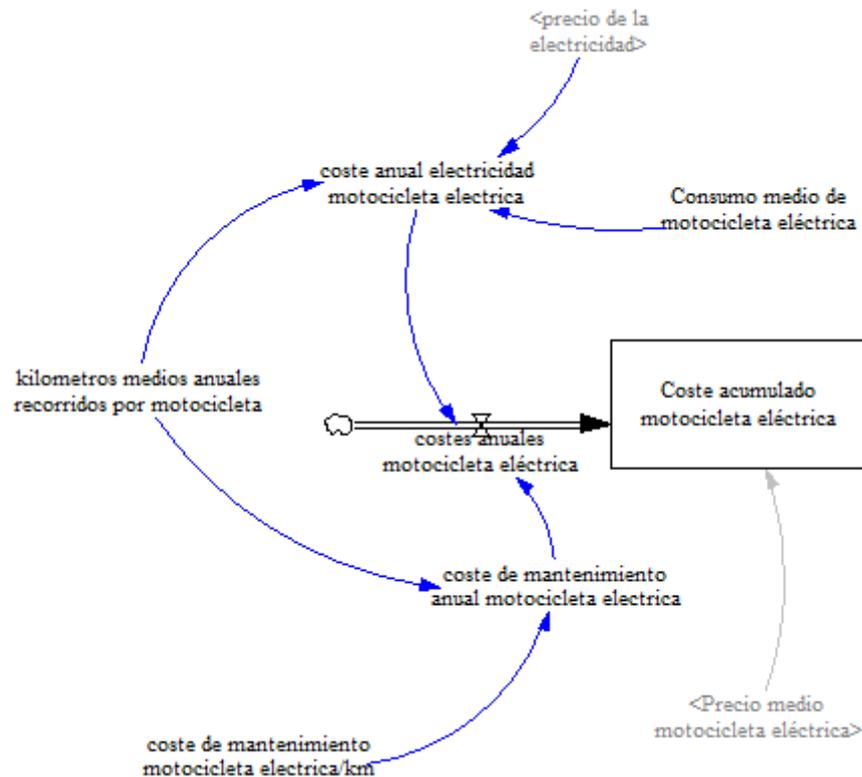
**Tabla 19: Coste de mantenimiento en motocicleta convencional por cada 100 km.**

Al multiplicar este valor por la variable que contiene los kilómetros medios anuales que recorre una motocicleta, dará lugar al valor económico que el cliente desembolsa de manera anual, debido al mantenimiento de la motocicleta convencional.

Una vez calculados ambos costes anuales debidos a la utilización de la motocicleta convencional, ambos son la entrada a un stock que será el coste acumulado de la motocicleta convencional.

### ***Sub-bloque de Coste anual de la motocicleta eléctrica***

El último sub-bloque a estudiar, es el correspondiente al coste anual de la motocicleta eléctrica. El esquema es similar al de la convencional, es decir, existe un coste anual debido al consumo que la motocicleta va a tener para su utilización, y otro coste debido al mantenimiento de la motocicleta. En la siguiente figura se puede observar el modelo del sub-bloque.



**Figura 138: Modelo del sub-bloque de coste anual de la motocicleta eléctrica.**

El coste anual debido al consumo de la motocicleta eléctrica se calcula en base al precio de la electricidad. Para ello se tienen en cuenta los datos obtenidos para el vehículo eléctrico en cuanto a ratios de posesión de garajes y de hábitos de utilización y recarga de los usuarios, y por supuesto, la previsión de fluctuación del precio de la electricidad.

Según esto, el consumo de electricidad de la motocicleta se obtendrá multiplicando el precio de la electricidad en el momento temporal determinado por el consumo medio que tiene una motocicleta eléctrica y por los kilómetros medios que recorre una motocicleta al año.

$$\text{coste anual electricidad motocicleta eléctrica} =$$

$$\text{Consumo medio de motocicleta eléctrica} * \text{kilometros medios anuales recorridos por motocicleta} * \text{precio de la electricidad}$$

Para el consumo medio de la motocicleta eléctrica se ha utilizado una media de las motocicletas estudiadas como se explicó anteriormente al igual que se hizo con la motocicleta convencional:

NOMBRE	BATERÍA	AUTONOMÍA	CONSUMO
<b>Vectrix VX1 Li</b>	3,7 kWh	80 km	4,6 kWh/100 km
<b>Vectrix VX1 Li+</b>	5,4 kWh	120 km	4,5 kWh/100 km
<b>Vectrix VX2</b>	2,8 kWh	80 km	3,5 kWh/100 km
<b>ZERO ZF6</b>	6 kWh	160 km	3,75 kWh/100 km

**Tabla 20: Autonomía y consumo de las principales motocicletas eléctricas.**

Según esto, se determina un valor de consumo medio de 4 kWh por cada 100 kilómetros recorridos.

Por último, sólo falta realizar el cálculo del coste de mantenimiento de la motocicleta eléctrica. El modo de calcularlo es idéntico al realizado para la motocicleta convencional. El coste de mantenimiento que una motocicleta eléctrica tiene a lo largo de su vida útil relativizado al número de kilómetros que realiza hasta que se reemplaza es de 0,015 € por cada kilómetro recorrido [García-Valdecasas08]. En la siguiente tabla se puede observar un resumen de este dato:

MANTENIMIENTO	COSTE POR 100KM MOTO. ELÉCTRICA
Aceite	0 €
Bujías	0 €
Filtro de aire	0 €
Filtro de aceite	0 €
Batería	1,5 €
Total/km	0,015 €

**Tabla 21: Coste de mantenimiento en motocicleta eléctrica por cada 100 km.**

Al multiplicar este valor por la variable que contiene los kilómetros medios anuales que recorre una motocicleta, se obtiene el valor económico que el cliente desembolsa de manera anual, debido al mantenimiento de la motocicleta eléctrica.

Por último, y al igual que sucedía en el caso de la motocicleta convencional, los costes anuales debidos a la utilización de la motocicleta son la entrada a un stock que será el coste acumulado de la motocicleta eléctrica.

## 6.5 Bloque del atractivo de la motocicleta eléctrica

El bloque del atractivo de la motocicleta eléctrica es el bloque en el que van a interrelacionar numerosas variables para cuantificar lo atractivo que la motocicleta eléctrica le resulta al cliente potencial. Al igual que ocurría con este bloque en el vehículo eléctrico, es un bloque de una gran complejidad y subjetividad.

Un diagrama a grandes líneas del modelo del bloque se puede ver en la figura siguiente.



**Figura 139: Diagrama de bloques del ratio de atractivo de la motocicleta eléctrica.**

Al comparar este diagrama con el utilizado en el vehículo eléctrico se puede observar que la gran diferencia es que se ha eliminado el factor de la publicidad puesto

que existe una diferencia muy importante entre los dos sectores en cuanto a publicidad se refiere, y se ha introducido el coste de adquisición puesto que como se verá posteriormente los clientes de motocicletas valoran enormemente este dato.

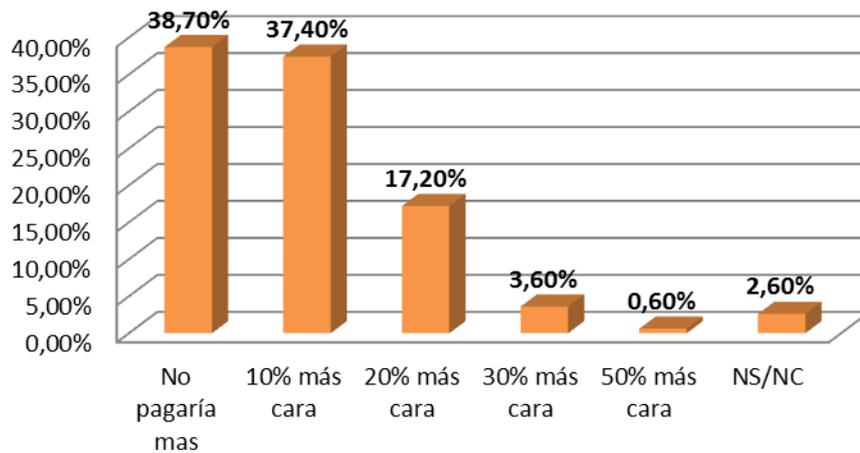
### ***Sub-bloque de Precio de Adquisición***

El primer sub-bloque a analizar es el del precio de adquisición de la motocicleta. Es conocido que una de las principales barreras a la implantación del vehículo eléctrico es su elevado precio, muy superior al de un vehículo convencional de características similares, factor que es igualmente importante en las motocicletas. Si bien es cierto que en las motocicletas al ser necesaria una inversión muy inferior, el cliente se fija mucho más en el precio de adquisición inicial de la motocicleta que en el periodo de amortización.

Para modelar esta preocupación, se han utilizado los datos de un estudio de RACC de la ciudad de Barcelona [Racc10]. De todos los datos estadísticos existentes se obtiene que la ciudad española que tiene una mayor utilización y compra de motocicletas es Barcelona, con valores de compra en los últimos años de crisis de más del 20% del total de las motocicletas vendidas en España. Según esto se puede determinar que los estudios realizados en esta ciudad serán muy significativos y fácilmente extrapolable al resto del territorio español.

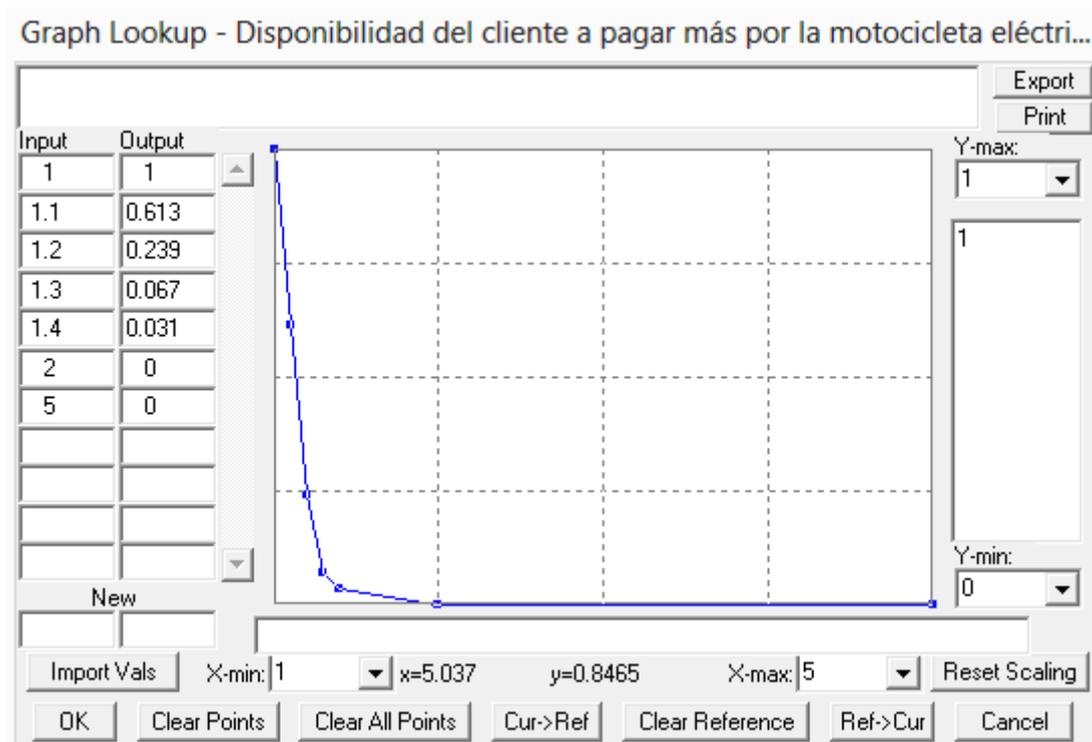
Según este estudio, una elevada parte de la población no estaría dispuesta a aceptar pagar un sobrecosto en la adquisición de una motocicleta eléctrica frente a una convencional en ningún caso. En el siguiente gráfico se puede ver los sobrecostos que estaría dispuesta a aceptar la población:

### Sobrecosto por porcentaje de población



**Figura 140: Sobrecosto que está dispuesto a aceptar el potencial consumidor de una motocicleta eléctrica [Racc10].**

Según se puede observar, un gran porcentaje de población no está dispuesto a asumir un sobrecosto por el hecho de adquirir una motocicleta eléctrica. Esto se ha modelado según los datos mostrados en la variable “Disponibilidad del cliente a pagar más por la motocicleta eléctrica” que se muestra a continuación.



**Figura 141: Modelo de la disponibilidad del cliente a pagar más por una motocicleta eléctrica.**

La entrada de la curva será el cociente entre el precio de una motocicleta eléctrica y una motocicleta convencional. Atendiendo al resultado, se determina el porcentaje de sobrecosto al que tendría que hacer frente. Por ejemplo, si el resultado de dicho cociente es 1,1 significa que la motocicleta eléctrica es un 10% más cara que la convencional. La salida de esta curva será un tanto por ciento de clientes potenciales que estarían dispuestos a adquirir una motocicleta eléctrica en función de esta característica de atractivo, es decir, asumiendo el sobrecosto.

### ***Sub-bloque de Amortización económica***

El segundo sub-bloque a analizar es el de la amortización económica. En este sub-bloque, también se tendrá en cuenta el anterior, puesto que dependiendo del coste de adquisición de la motocicleta, los años en los que se amorticen la inversión también variarán.

El cálculo de esta característica de atractivo se determina atendiendo a los costes de compra y de explotación de la motocicleta eléctrica y de la convencional (TCO), obteniendo el tiempo en que tarda en amortizarse la inversión de una frente a la otra. Es decir, en cuantos años, la sobre-inversión por la compra de la motocicleta eléctrica, al posible cliente le sale rentable. Obviamente, cuantos más años tarde en amortizar la inversión, menos atractivo tendrá la motocicleta eléctrica. Lo que se determina es el momento en que las curvas TCO de ambos tipos de motocicletas se cruzan para así localizar el punto de amortización.

En la siguiente figura se puede ver el modelo del sub-bloque

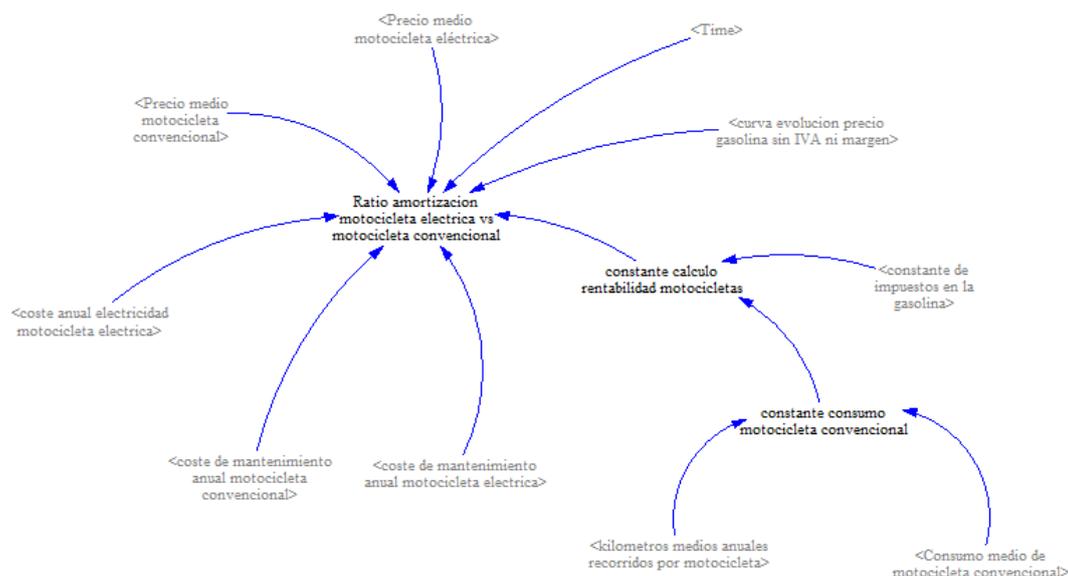


Figura 142: Modelo del sub-bloque de amortización económica de la motocicleta eléctrica.

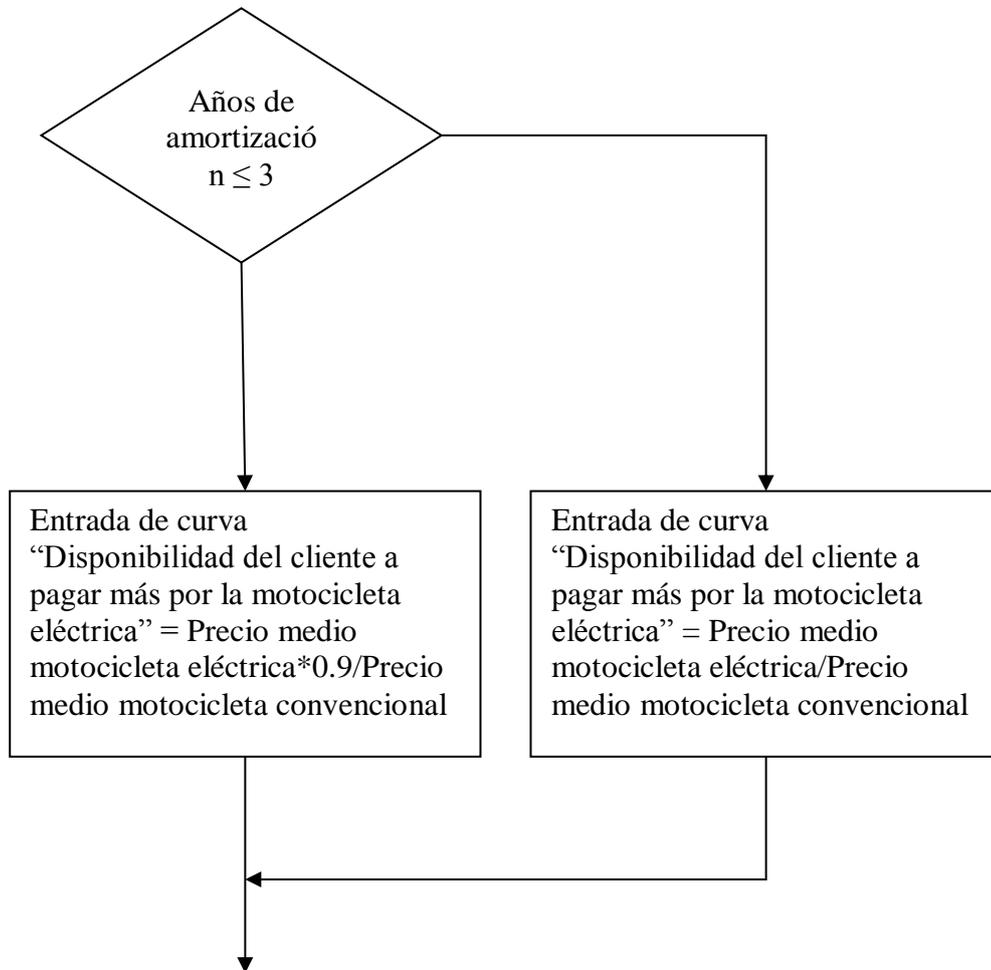
La base para el cálculo es idéntica a la utilizada para el vehículo eléctrico por lo que no se va a profundizar nuevamente en ella.

Tal y como sucedía en el vehículo eléctrico, estas curvas no van a ser siempre idénticas, puesto que los costes irán variando con el tiempo. No tendrá el mismo coste de compra de una motocicleta eléctrica un cliente que lo compre en el 2013, a otro que la compre en el 2017 por ejemplo. Esto es lo que se ha modelado en la variable denominada “Ratio amortización motocicleta eléctrica vs motocicleta convencional”. Para su cálculo se ha utilizado el bucle de comparaciones diseñado para el vehículo eléctrico en el que se comparan los costes de adquisición y de funcionamiento de ambos tipos de motocicletas en función del tiempo, obteniendo como resultado del mismo el número de años en los que se tarda en amortizar la inversión.

Para el caso de las motocicletas la variable resultante que se ha programado en Vensim se puede localizar en el anexo de programación con el nombre de variable “Ratio amortización motocicleta eléctrica vs motocicleta convencional”.

Una vez se haya obtenido el valor en años del tiempo de amortización, este dato podrá afectar a la percepción del cliente del sobrecosto de adquisición de la motocicleta eléctrica. Esto se ha modelado en la propia variable del atractivo de la motocicleta eléctrica. Si el resultado del periodo de amortización es inferior a 3 años, se

indica que el precio de la motocicleta eléctrica será el 90% del real en dicho momento para poder utilizar la curva de datos estadísticos explicada en el anterior sub-bloque, mientras que si el resultado es superior a 3 años, no se tendrá en cuenta para la curva. En el siguiente diagrama de flujo se puede ver la explicación del proceso:



**Figura 143: Diagrama de flujo de la influencia de la amortización.**

### ***Sub-bloque de Autonomía de la batería***

Uno de los principales inconvenientes de la motocicleta eléctrica en la actualidad es la limitada autonomía de la que dispone. Como se ha explicado en el bloque de la batería, para el desarrollo de este estudio, se parte de la premisa de una batería de aproximadamente 110 kilómetros de media entre los grupos estadísticos de motocicletas, que se irá desarrollando en el tiempo a medida que evolucione el mercado.

Según los estudios [Racc10], el 70% de los usuarios realiza menos de 40 kilómetros diarios como se puede ver en la siguiente figura.

### Kilómetros que recorren diariamente

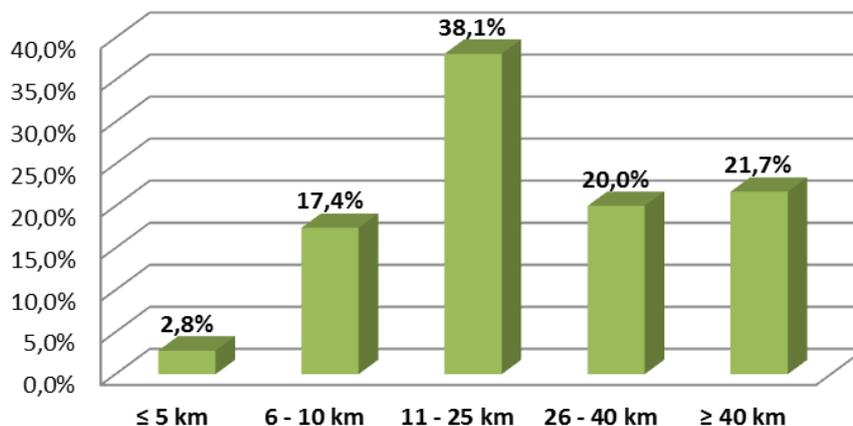


Figura 144: Kilómetros que recorren diariamente los usuarios de motocicletas [Racc10].

Según esto con la autonomía que se ha partido de base de 110 kilómetros de media es más que suficiente para la vida cotidiana, pero el disponer de una autonomía inferior a la motocicleta convencional y la necesidad de carga la batería ejerce un factor psicológico importante en los posibles compradores. Por ello, para modelar este factor, también se han utilizado datos estadísticos en los que se muestran el deseo del cliente potencial de la autonomía que debe tener la motocicleta eléctrica [Racc10]. En la figura siguiente se muestra los resultados estadísticos contemplados en este estudio.

### Kilómetros de autonomía deseada

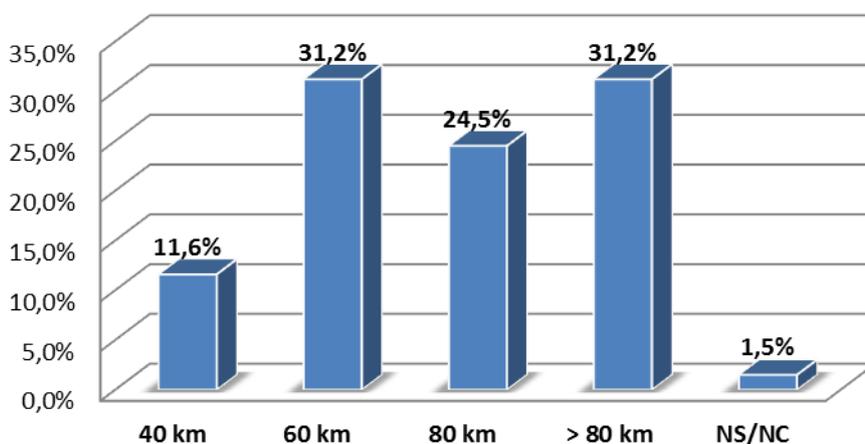
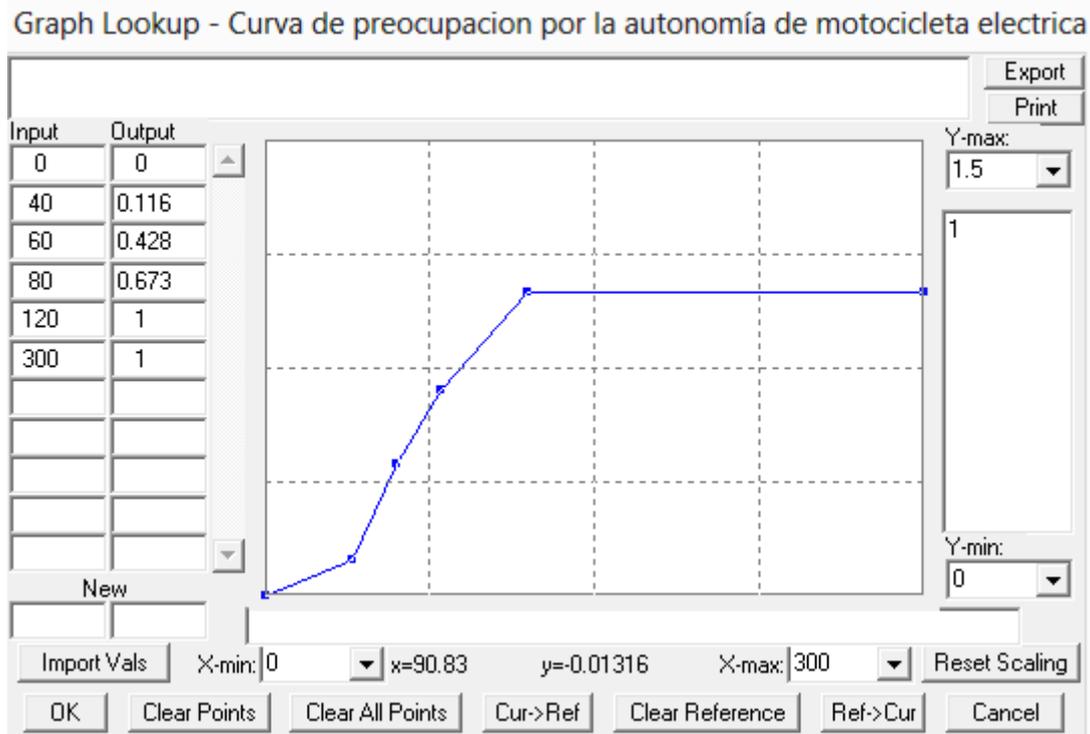


Figura 145: Kilómetros de autonomía deseada por los usuarios potenciales de motocicletas eléctricas [Racc10].

Esto refleja lo mencionado anteriormente, es decir, que a pesar de que la mayoría de los conductores de motocicletas realizan menos de 40 kilómetros diarios, desean disponer de una autonomía muy superior. Según estos datos se ha modelado la curva de preocupación del cliente por la autonomía.

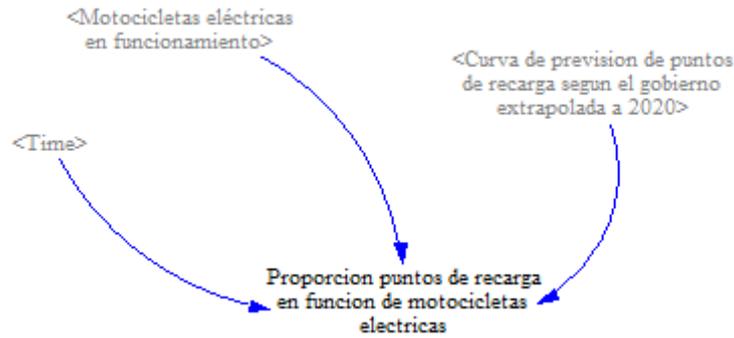


**Figura 146: Curva de preocupación de la autonomía de la motocicleta eléctrica.**

La entrada de esta curva serán los kilómetros de autonomía y la salida será el porcentaje de población que aceptaría el adquirir una motocicleta eléctrica, teniendo en cuenta únicamente la autonomía de la misma.

### ***Sub-bloque de preocupación por los puntos de recarga***

El siguiente sub-bloque corresponde con la preocupación de la población por los puntos de recarga existentes, modelado según se muestra a continuación.

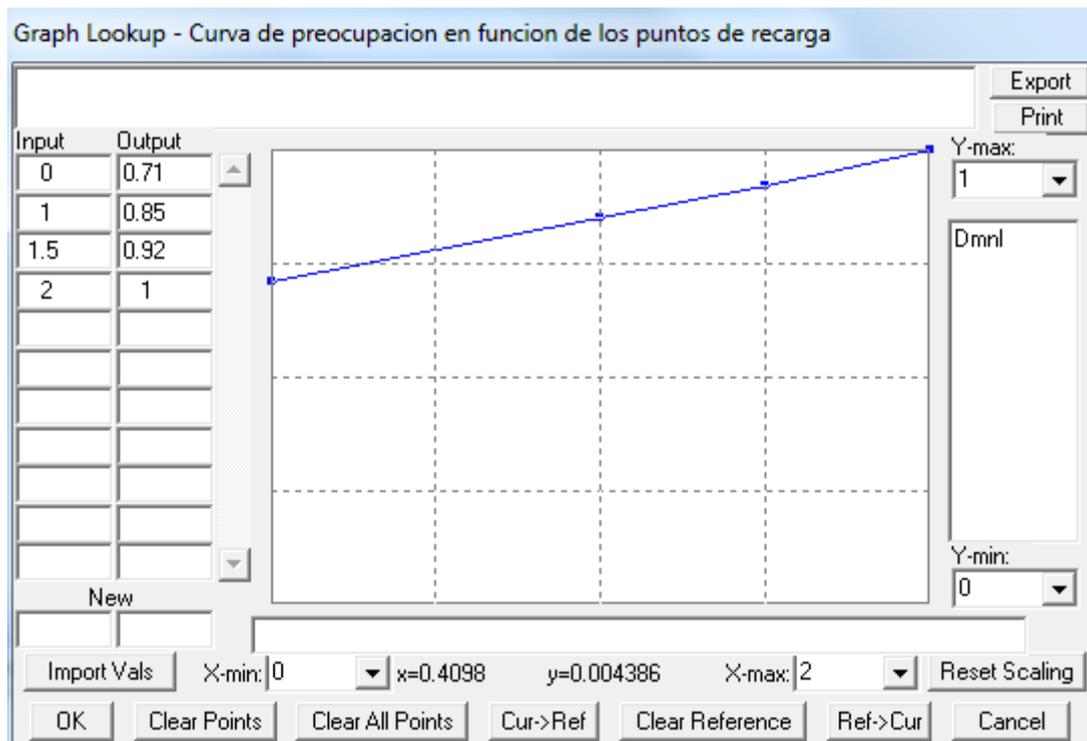


**Figura 147: Modelo del sub-bloque de preocupación por los puntos de recarga.**

La disponibilidad de una infraestructura de carga es esencial para la introducción en el mercado de motocicletas eléctricas de igual manera que sucedía en su homólogo de cuatro ruedas. Al tener una batería mucho más reducida que en el caso del vehículo eléctrico, no se van a contemplar diferentes alternativas de carga.

Para la estimación de los puntos de recarga que se van a instalar en los próximos años se utilizan los mismos datos que se utilizaron en el vehículo eléctrico, es decir, la previsión que el Gobierno tiene respecto al número de puntos de carga que van a existir reflejados en la “Estrategia Integral para el Impulso del Vehículo eléctrico en España”[Industria10b]. En estos puntos de recarga previstos, se encuentran incluidos tanto los puntos de recarga de particulares en sus domicilios, como los puntos de recarga en aparcamientos, calles y centros comerciales. Asimismo están incluidos el número de puntos que se instalarán en vías y lugares públicos, como son centros comerciales, aparcamientos, etc.

La curva de previsión de puntos de carga debe cruzarse con la preocupación de los consumidores por este número de puntos de carga. Esta preocupación de los consumidores se ha modelado utilizando los mismos datos que se emplearon en el caso de los vehículos eléctricos, es decir, utilizando los datos de TEPCO [Electrification09]. Dicha curva es la que se muestra a continuación:



**Figura 148:** Curva de preocupación de los ciudadanos por el número de puntos de recarga.

La entrada de esta curva será la proporción de cargadores respecto al número de motocicletas existentes, valor que estará almacenado en la variable “Proporción puntos de recarga en función de motocicletas eléctricas”.

*Proporción puntos de recarga en función de motocicletas eléctricas=*

*IF THEN ELSE(Motocicletas eléctricas en funcionamiento>0, Curva de previsión de puntos de recarga según el Gobierno extrapolada a 2020(Time)/Motocicletas eléctricas en funcionamiento,0)*

Antes de realizar el cálculo, se tiene que hacer una comprobación de que realmente existen motocicletas eléctricas en funcionamiento, para no obtener un problema de cálculo al dividir entre 0.

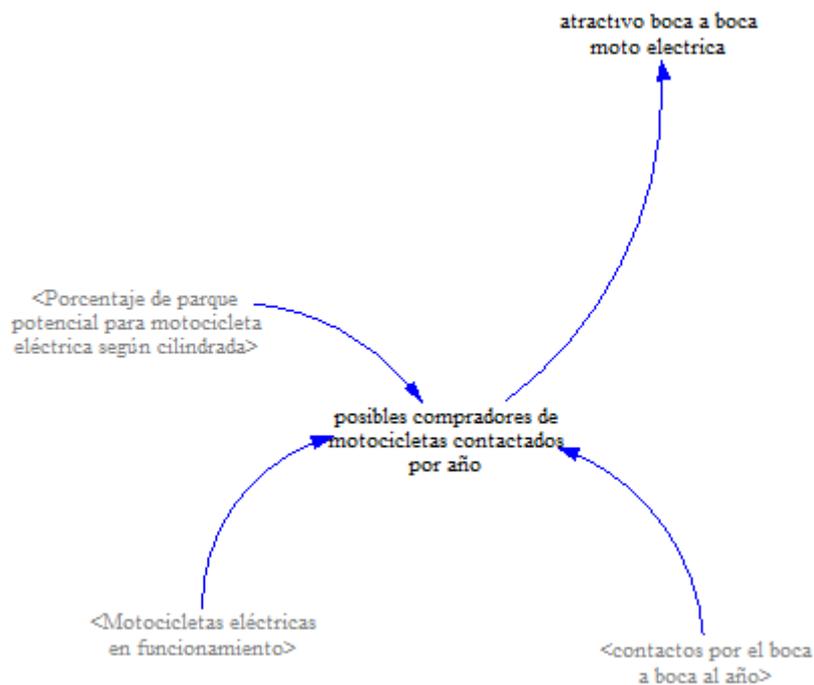
***Sub-bloque del Boca a boca***

El último sub-bloque a modelar corresponde con el atractivo que se vaya a generar por el boca a boca entre los consumidores iniciales. Tal y como se ha visto anteriormente, en la adaptación de cualquier nueva tecnología o producto, es muy

importante la imagen que se transmita del mismo. Por ello, el boca a boca va a ser un factor vital en la implantación de la motocicleta eléctrica.

Una vez que la gente comienza a usar el producto, ellos exponen el producto a otras personas por medio del boca a boca, y cuanto mayor sea la cantidad de personas que utilizan el nuevo producto, mayor será la exposición social. En nuestro caso, cuanto mayor es el porcentaje de usuarios de motocicletas eléctricas, mayor es la propagación del conocimiento por el boca a boca del nuevo producto lo que refuerza el bucle.

El modelo se puede observar a continuación



**Figura 149: Modelo del sub-bloque del boca a boca.**

Se asume que cada usuario activo del vehículo eléctrico, tiene contacto con dos potenciales compradores de motocicleta eléctrica al año [Movilla09]. El hecho de tener contacto con dos potenciales compradores no implica que cada uno de ellos vaya a adquirir una motocicleta eléctrica.

$$\text{contactos por el boca a boca al año} = 2$$

El porcentaje de posibles compradores contactados por año corresponderá con el porcentaje de usuario de la motocicleta eléctrica respecto al parque, multiplicado por el número de contactos por año.

*posibles compradores de motocicletas contactados por año =*

*Motocicletas eléctricas en funcionamiento\*contactos por el boca a boca al año/Porcentaje de parque potencial para motocicleta eléctrica según cilindrada*

Por último, se calcula el ratio del atractivo del boca a boca que vendrá determinado por estos contactos realizados, y el atractivo que se haya generado en ellos por las características actuales de la motocicleta eléctrica.

Para ello, se multiplica el porcentaje de compradores potenciales contactados por el atractivo de la motocicleta eléctrica (variable que se está calculando con todos los términos de los diversos sub-bloques y que se verá a continuación).

*atractivo boca a boca moto eléctrica =*

*atractivo de motocicleta eléctrica\*posibles compradores de motocicletas contactados por año*

Con esto se consigue modelar lo anteriormente descrito: de todos los compradores susceptibles contactados, sólo una fracción determinada llegarán a adquirir la motocicleta. Lógicamente, cuanto mayor sea el atractivo de la motocicleta eléctrica, mayor serán las posibilidades de “convencer” al cliente potencial.

### ***Cálculo del Atractivo***

Para realizar el cálculo del atractivo propiamente dicho, tendrán que interrelacionar todas las variables y factores anteriormente descritos.

A diferencia del caos de los vehículos eléctricos, no ha sido necesario incluir un retardo por falta de modelos puesto que hay una competencia importante en el sector.

El cálculo de la variable del atractivo quedará de la siguiente manera:

$$\text{Atractivo} = \text{Sobrecosto inicial (amortización)} \cdot \text{autonomía} \cdot \text{puntos de recarga}$$

La variable en Dinámica de Sistemas será:

$$\text{atractivo de motocicleta eléctrica} =$$

*Disponibilidad del cliente a pagar más por la motocicleta eléctrica (IF THEN ELSE (Ratio amortización motocicleta eléctrica vs motocicleta convencional < 3, Precio medio motocicleta eléctrica \* 0.9 / Precio medio motocicleta convencional, Precio medio motocicleta eléctrica / Precio medio motocicleta convencional)) \* ratio preocupación por la autonomía de la motocicleta eléctrica \* Curva de preocupación en función de los puntos de recarga (MIN (Proporción puntos de recarga en función de motocicletas eléctricas, 2))*

Como se explicó anteriormente, la disponibilidad del cliente a pagar un sobrecosto inicial por la motocicleta eléctrica, estará influenciado por el valor de la amortización. Si este valor es inferior a 3 años, se considera que la motocicleta eléctrica tiene un valor del 90% a efectos de cálculos.

Este valor es el que se ha considerado como el atractivo que la motocicleta eléctrica va a tener para el cliente potencial, pero a este valor le falta de añadir el atractivo generado por el boca a boca, con lo que se obtendrá el “ratio de atractivo motocicleta eléctrica”.

Según esto, el ratio de atractivo vendrá determinado por la suma del atractivo propio de la motocicleta eléctrica por sus características propias y del entorno, más el atractivo generado por el boca a boca explicando con anterioridad. Si este valor se multiplica por la renovación prevista del parque de motocicletas de manera anual, se obtiene el valor porcentual de motocicletas eléctricas que se pueden llegar a adquirir anualmente debido al atractivo de las mismas.

$$\text{ratio de atractivo motocicleta eléctrica} =$$

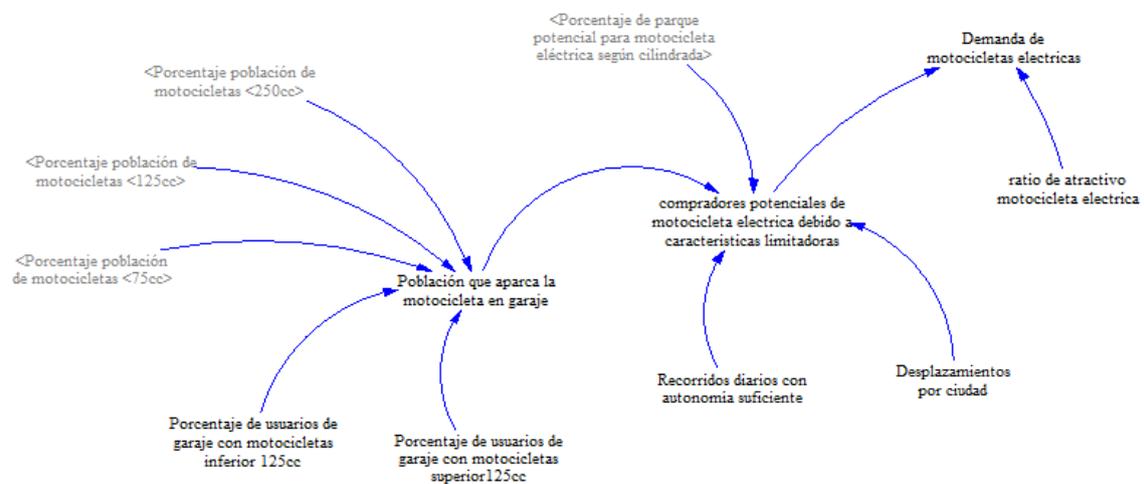
*(atractivo boca a boca moto eléctrica + atractivo de motocicleta eléctrica) \* renovación parque motocicletas*

Este ratio de atractivo, además de ser la salida del bloque del atractivo, será la entrada del bloque de la demanda.

## 6.6 Bloque de demanda de la motocicleta eléctrica

El bloque de la demanda de la motocicleta eléctrica consiste en relacionar el atractivo de la motocicleta eléctrica con las características propias de la motocicleta eléctrica para obtener el número de clientes potenciales.

El modelo del bloque es el que se muestra a continuación.



**Figura 150: Modelo del bloque de demanda de la motocicleta eléctrica.**

Se puede observar que la demanda de la motocicleta eléctrica va a venir determinada por dos factores como se ha mencionado anteriormente, que son, el ratio de atractivo del motocicleta eléctrica (calculado en el bloque del atractivo), y el número de compradores potenciales que la motocicleta eléctrica va a tener debido a sus características y la relación del posible cliente con ellas. Es decir, pese a todo el atractivo que la motocicleta eléctrica pueda tener, hay cierta parte de la población que no va a poder utilizar la motocicleta eléctrica.

Estas características, se has modelado atendiendo a tres puntos principales:

- Recorridos diarios con autonomía suficiente.
- Desplazamientos por ciudad.
- Disponibilidad de garaje propio.

Es decir, el cliente potencial de la motocicleta eléctrica, va a ser una persona que resida principalmente en una ciudad, que posea garaje propio, y que los trayectos que realice sean de carácter urbano con una autonomía relativamente reducida, es decir, por la propia ciudad y no realizando viajes entre ciudades [Racc10].

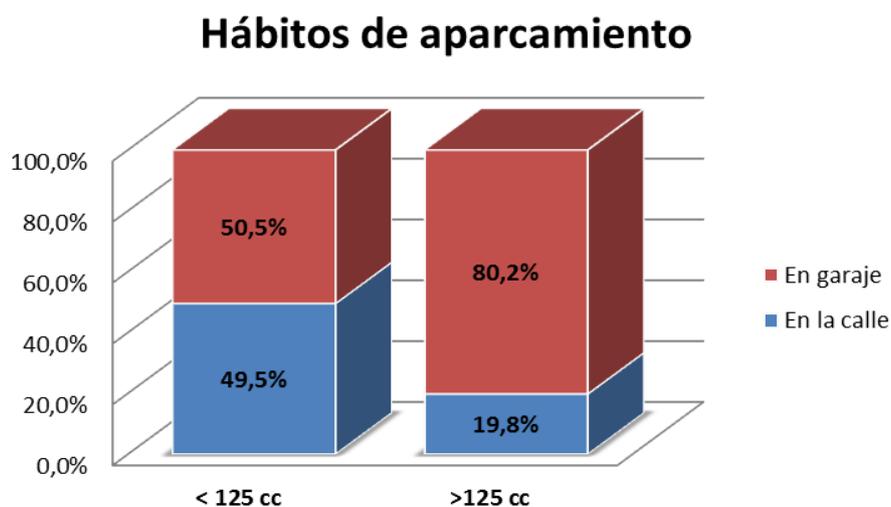
Para el modelado de estas características, se toma como dato de partida el estudio de RACC [Racc10]. En dicho estudio se indica que el 78,3% de los usuarios de motocicletas realizan menos de 40 kilómetros diarios, lo cual será la primera característica limitadora.

$$\text{Recorridos diarios con autonomía suficiente} = 0.783$$

En cuanto a los desplazamientos por ciudad, del estudio se refleja que el 89% de los usuarios de motocicletas se desplazan por las calles y por las rondas de la ciudad exclusivamente, mientras que el 8,2% también se desplazan por carreteras. Por último, existe un 2,8% de la población que únicamente realiza desplazamientos por carreteras. Según esto la segunda característica limitadora será

$$\text{Desplazamientos por ciudad} = 0.89$$

En último lugar se tiene que determinar el porcentaje de población que posea una motocicleta y además aparque en garaje. Para ello se utilizan los datos estadísticos del estudio que se reflejan en la siguiente gráfica.



**Figura 151: Hábitos de aparcamiento de los usuarios de motocicletas en función de su cilindrada [Racc10].**

Estos datos se almacenarán en las variables

*Porcentaje de usuarios de garaje con motocicletas inferior 125cc= 0.505*

*Porcentaje de usuarios de garaje con motocicletas superior 125cc= 0.802*

Al multiplicar los porcentajes de población que utiliza garaje por los porcentajes de población de cada tipo de motocicleta según la cilindrada se obtendrá el porcentaje de población medio que aparca en garaje.

*Población que aparca la motocicleta en garaje= ("Porcentaje población de motocicletas <75cc"+"Porcentaje población de motocicletas <125cc")\*Porcentaje de usuarios de garaje con motocicletas inferior 125cc+("Porcentaje población de motocicletas <250cc"\*Porcentaje de usuarios de garaje con motocicletas superior125cc)*

Al multiplicar estos tres condicionantes de la motocicleta eléctrica entre sí, se obtiene el porcentaje de población que por las características de la motocicleta eléctrica puede utilizarlo. Esto es sin tener en cuenta todavía que el cliente esté interesado en la motocicleta eléctrica o no, es decir, este valor indica qué cantidad de población es un cliente potencial.

Al multiplicar este valor por el parque de motocicletas, se obtiene los clientes potenciales relativizados al parque de motocicletas, obteniendo la siguiente variable:

*compradores potenciales de motocicleta eléctrica debido a características limitadoras=*

*Desplazamientos por ciudad\*Recorridos diarios con autonomía suficiente\*Población que aparca la motocicleta en garaje\*Porcentaje de parque potencial para motocicleta eléctrica según cilindrada*

Si se multiplica este valor recién obtenido por el ratio de atractivo calculado en el bloque del atractivo, se obtendrá el valor de la demanda anual existente de motocicletas eléctricas en el mercado español. Hay que tener en cuenta que el ratio de

atractivo ya está relativizado a la renovación del parque de motocicletas anual, lo que convierte a la demanda en anual también.

*Demanda de motocicletas eléctricas=*

*compradores potenciales de motocicleta eléctrica debido a características limitadoras\*ratio de atractivo motocicleta eléctrica*

Este valor de la demanda de la motocicleta eléctrica anual será la entrada del bloque de fabricación de la motocicleta eléctrica.

## 6.7 Bloque de decisiones del Gobierno

Para este último bloque se ha utilizado el modelo ya creado para el vehículo eléctrico y se ha añadido la cuantía de la subvención que se entregaría por la compra de una motocicleta eléctrica.

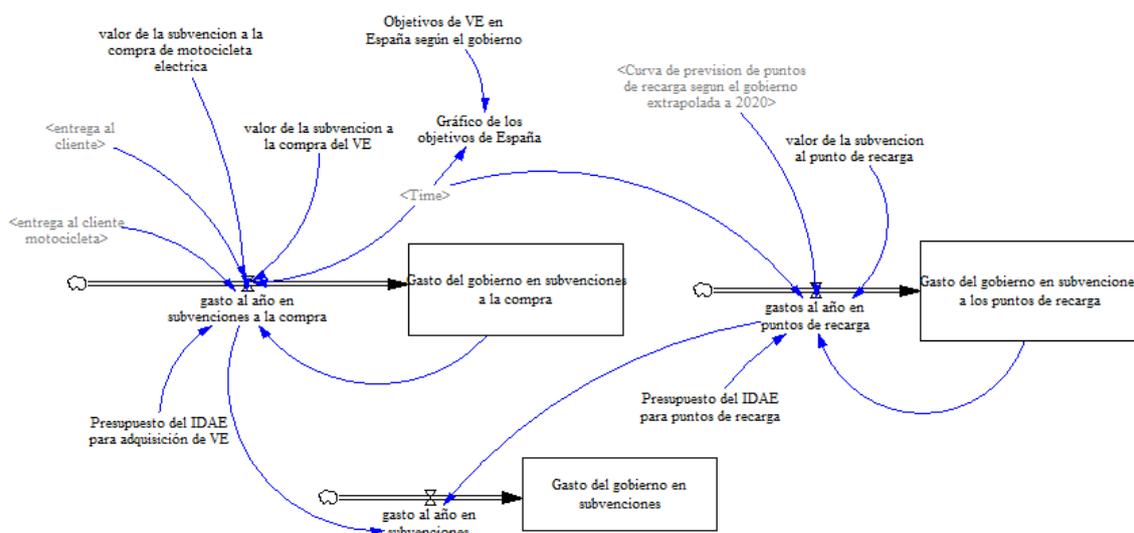


Figura 152: Modelo del bloque de decisiones del Gobierno.

La compra se verá subvencionada con la cantidad fijada en la variable “valor de la subvención a la compra de motocicleta eléctrica”, siempre y cuando, el gasto del Gobierno no sea superior al presupuestado por el IDAE para la adquisición de vehículos eléctricos (8 millones de euros en 2009 y 2010, y 240 millones en 2011 y 2012 a pesar de que se redujo dicho presupuesto como se ha explicado con anterioridad). Según el proyecto Movele como se ha indicado con anterioridad, tenía dedicadas ayudas para la

adquisición de motocicletas eléctricas que variaban entre los 750€ y los 1200€ según la curva de eficiencia energética del vehículo, pero siempre que estuvieran en la categoría L3e explicada con anterioridad. Para el caso del modelo base, se ha tomado como subvención a la compra 1.200 euros.

El resto del bloque será idéntico al explicado para el caso del vehículo eléctrico.

La gran diferencia que va a existir con el vehículo eléctrico pero que se verá en el capítulo de resultados es que a partir del año 2013 las subvenciones a la adquisición de motocicletas eléctricas se han eliminado según el Real Decreto 294/2013, puesto que según el Gobierno, actualmente existe una mayor oferta que contribuye a obtener las mejoras medioambientales y de eficiencia energética prevista, con unos costes competitivos, por lo que no se considera tan necesario mantener el apoyo a este tipo de vehículos.

## Capítulo 7

# Principales diferencias del modelo del año 2010 frente al modelo de 2013

A pesar de que en todo momento se ha explicado el modelo general creado, es necesario indicar que este modelo es una evolución de la primera versión desarrollada en 2010 y que como consecuencia de la evolución de la economía y las políticas del Gobierno ha sufrido de evoluciones y actualizaciones. En esta nueva versión se ha añadido la motocicleta en el modelo y se ha profundizado tanto de manera teórica como práctica en aspectos tratados de manera superficial y con simplificaciones en el primer modelo.

El modelo inicial que se creó en el 2010 estaba basado en las hipótesis económicas que se cumplían los años anteriores, así como los compromisos políticos y previsiones económicas. Por otro lado algunas variables que fueron estimadas con muy pocos datos se han podido afinar posteriormente con mayor número de datos reales históricos. En dicho modelo se obtuvieron unos resultados [García12] que difieren de los obtenidos en la actualidad y que se verán posteriormente en el capítulo de resultados y simulaciones.

Debido a esto, es necesario realizar al menos una mínima descripción de los principales cambios introducidos en el modelo que van a ser fundamentalmente en materia económica. El más importante de los ajustes que se hicieron a la realidad, fue el que implicó los costes del vehículo eléctrico, puesto que en la primera versión se estimaban unos costes asociados al vehículo eléctrico que no se podían corroborar puesto que no existían datos reales de precios de adquisición, pero que a medida que el tiempo ha pasado se han podido ajustar a la realidad variando enormemente los resultados del modelo en sus diferentes simulaciones.

Los costes del vehículo eléctrico que nos estuvieron contemplados en el inicio del estudio son:

- Convertidores AC/DC y DC/DC.
- Controlador del motor eléctrico.
- Bus de alta tensión.
- Sistemas asociados a la batería.

También se varió el precio de adquisición del vehículo convencional que a su vez implicaba un cambio en el precio de adquisición del vehículo eléctrico ya que se ajustaron los precios al mercado.

En cuanto a las políticas de incentivos a la adquisición del Gobierno se han tenido que adecuar a los nuevos años, puesto que las cuantías y presupuestos se han visto reducidos con el paso de los años como se ha explicado en los capítulos anteriores.

Asimismo, se han actualizado los retardos a la implantación debidos a la falta de modelos puesto que se ha ido contrastando con datos reales, y se ha modificado también los retardos a la implantación de estaciones de intercambio de baterías, actualizando el estado temporal a la actualidad.

Obviamente, también se han ajustado a la realidad los precios de los años posteriores los precios del petróleo y de la electricidad, así como la creación de la tarifa supervalde por parte del Gobierno.

Este cúmulo de pequeños cambios ha dado como resultado la modificación de los resultados del modelo en una gran medida como se verá posteriormente, puesto que

la mayoría de estos cambios (por no decir todos) han ido en detrimento de la posible implantación del vehículo eléctrico en España como se verá más adelante.



## Capítulo 8

# Simulación de escenarios y resultados

Para la obtención de resultados se han simulado una serie de escenarios, atendiendo a diferentes valores tecnológicos y económicos. Para estas simulaciones y escenarios, se ha partido de lo que se ha denominado escenario base. Este escenario, contiene todos los parámetros y valores más posibles, que son los que se han ido comentando durante la explicación del modelo. Estos valores, son los previsionales, que se tienen en la actualidad, a falta de nuevas decisiones.

Sobre este escenario base, se van a variar los parámetros más importantes sobre los que existen ciertas incertidumbres razonables y analizar en qué manera afectan al resultado.

Según esto, se ha decidido realizar el análisis de varios escenarios además del base:

- Escenarios de evolución de la capacidad de la batería.
- Escenarios de evolución del coste de la batería.
- Escenarios de evolución de la implantación de estaciones de intercambio de baterías.
- Escenarios de evolución de puntos de carga.

- Escenarios de evolución de las subvenciones.
- Escenarios de evolución del precio del petróleo.
- Escenarios de evolución del precio de la electricidad.
- Escenarios de evolución del mix eléctrico.
- Escenarios pesimista y optimista globales.
- Escenarios de evolución de las motocicletas eléctricas en función de los escenarios anteriores.

Para los tres primeros escenarios, se va a analizar qué acciones sobre la variable en la que se puede actuar, que van a ser las políticas económicas de apoyo a la adquisición del vehículo eléctrico, que en adelante serán denominadas subvenciones, pueden dar lugar a una mejor implantación del vehículo eléctrico acorde a los objetivos fijados por el Gobierno.

En cuanto al cuarto escenario se pretende ver la evolución de los vehículos eléctricos en función de los puntos de recarga existentes y su influencia sobre ellos.

Respecto al quinto escenario, la intención es el análisis del escenario base pero variando las políticas de subvenciones para intentar ajustar el número de vehículos eléctricos que circulan por España en el año 2020 al objetivo gubernamental.

Los siguientes escenarios se centran en las posibles evoluciones de los precios de los combustibles utilizados por los diferentes tipos de vehículos.

El siguiente escenario trata de demostrar la importancia del mix eléctrico en los resultados económicos del modelo.

El penúltimo escenario va a tratar valores globales en cuanto a datos optimistas y pesimistas, es decir, se pretende ver las mejores y las peores situaciones posibles así como su evolución dependiendo de las subvenciones utilizadas.

Por último, se trata de tener una breve visión de la evolución del mercado de las motocicletas eléctricas en función de los escenarios anteriormente citados.

## 8.1 Análisis de sensibilidad

Antes de comenzar con la explicación de los diversos escenarios a estudiar, es interesante realizar un análisis de sensibilidad del modelo. Para ello, se parte del escenario base, o escenario más previsible, y se estudia la dependencia de los resultados obtenidos, en función de las variaciones de los parámetros.

Para este análisis se van a variar parámetros principales como la autonomía de la batería, el coste de la batería, el número de estaciones de intercambio de baterías, el valor de las subvenciones a la compra aplicadas por el Gobierno y el precio del petróleo.

Al analizar la sensibilidad del modelo respecto a la variación de la capacidad de la batería, se obtiene que el modelo posee una sensibilidad baja, es decir, no está sujeto a grandes variaciones en la salida (número de vehículos eléctricos) en función de la evolución de la capacidad de la batería. Para realizar el análisis, se lleva la evolución de la capacidad de la batería a valores extremos, como son un 50% menos de mejora anual, y un 100% más.

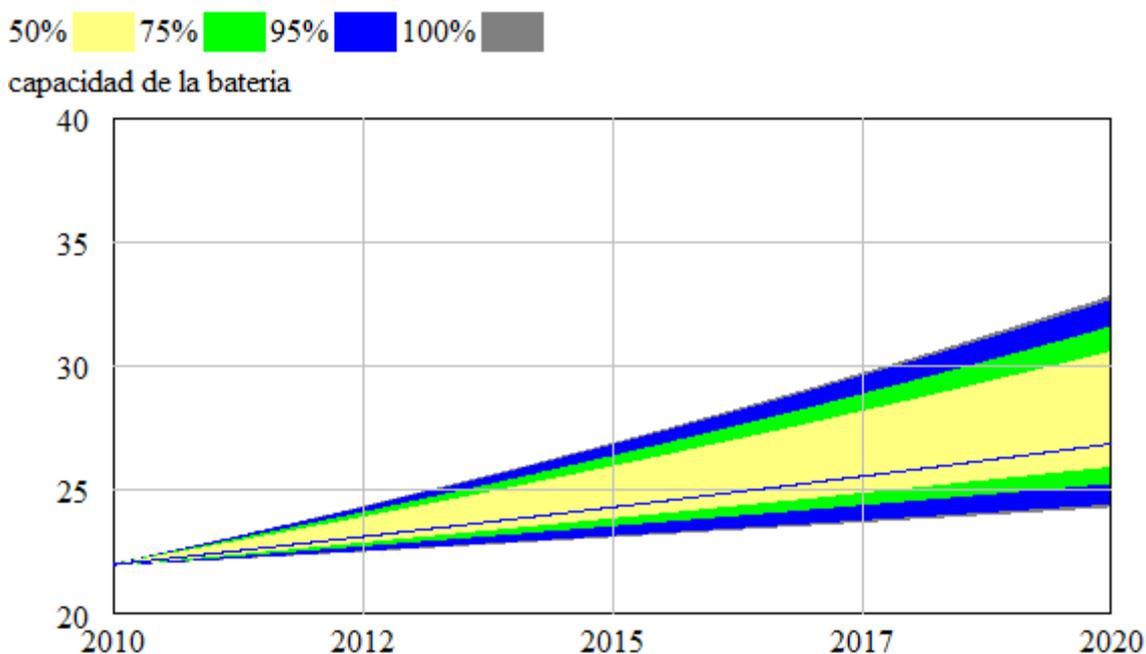
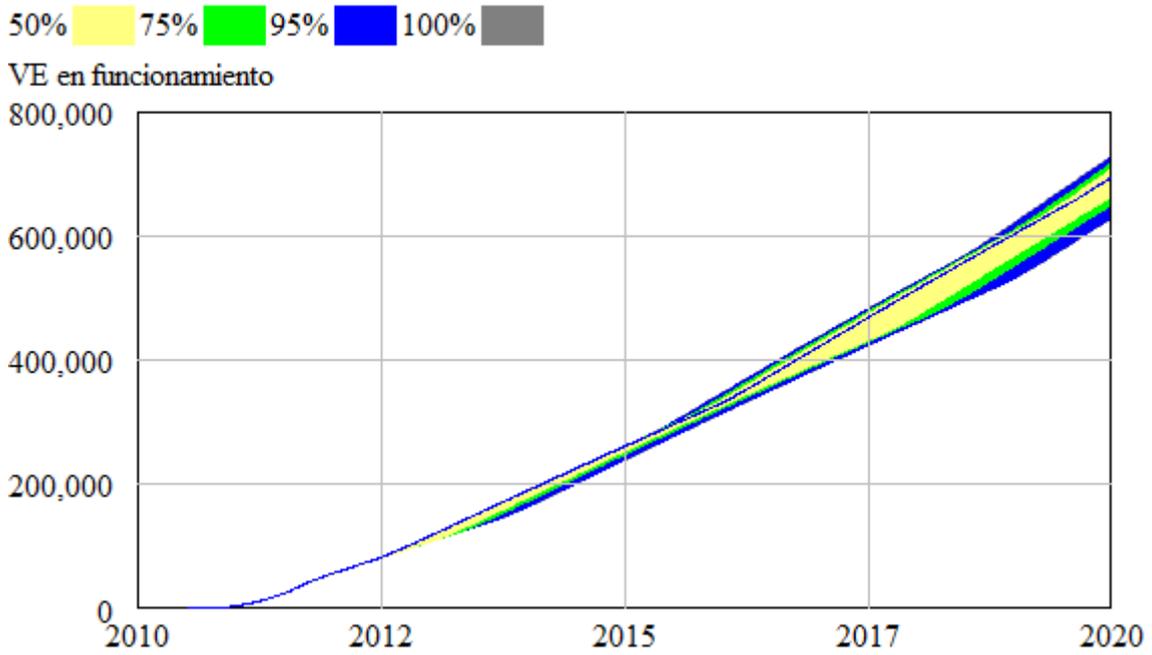


Figura 153: Análisis de sensibilidad de la entrada capacidad de la batería.

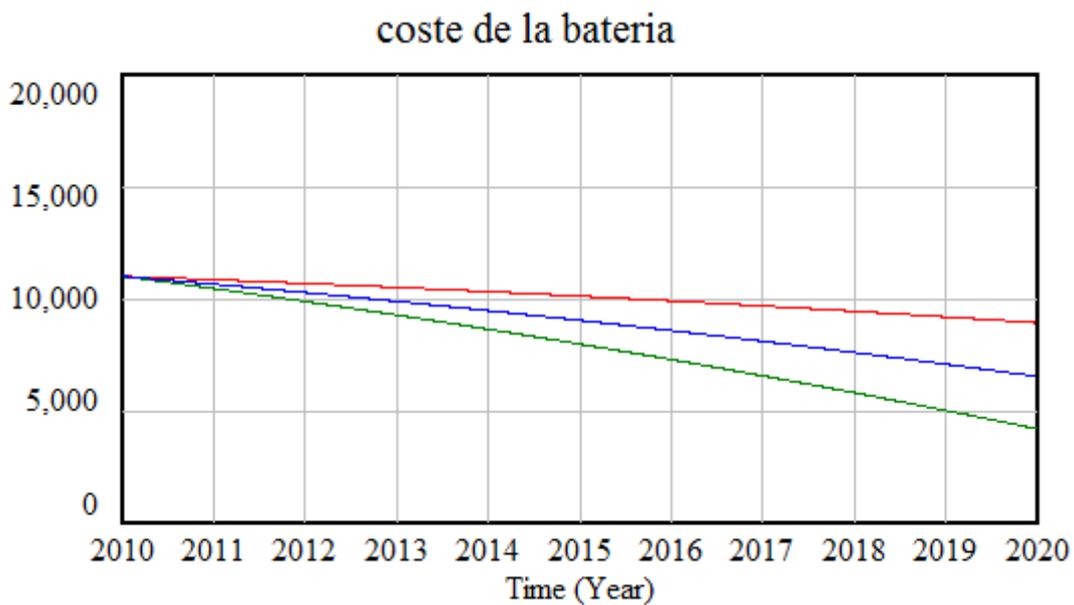
con lo que se obtiene una salida del modelo



**Figura 154: Análisis de sensibilidad de la salida número de vehículos eléctricos.**

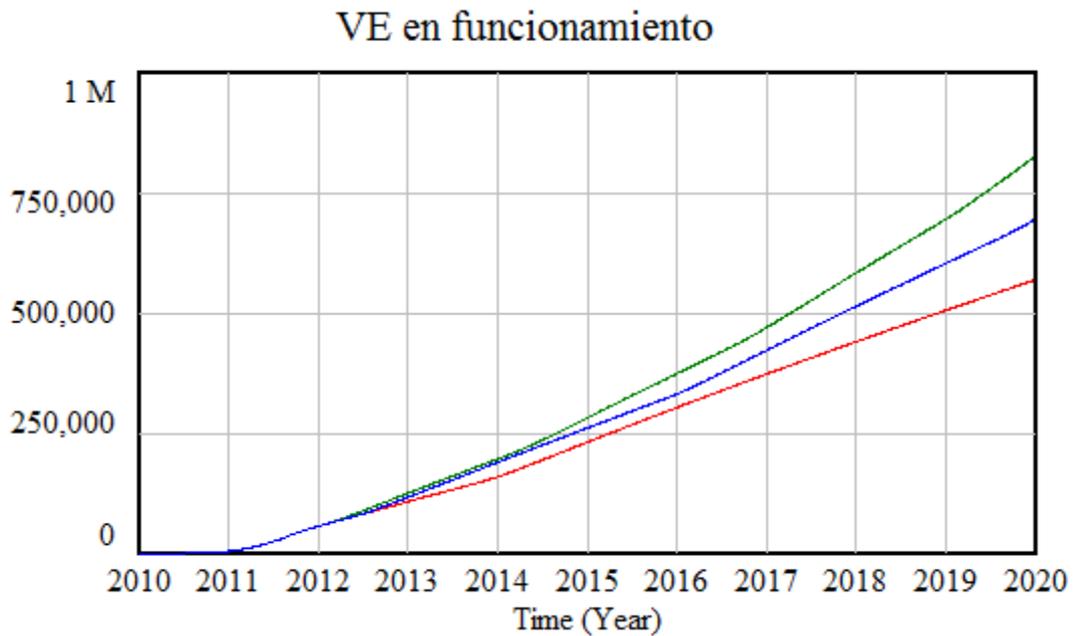
En este caso, para variaciones de la variable de entrada de incluso un 100%, se obtienen variaciones de la salida de aproximadamente un 8%.

En cuanto a la evolución del coste de la batería, se va a analizar la sensibilidad del modelo, teniendo en cuenta valores de descenso de un 50% superiores al previsto, y de 50% inferiores al previsto.



**Figura 155: Análisis de sensibilidad de la entrada coste de la batería.**

En la siguiente gráfica se ve los resultados de la salida del modelo.



**Figura 156: Análisis de sensibilidad de la salida número de vehículos.**

Para unas variaciones de la entrada de un 50% de la evolución del coste de la batería respecto al escenario base, se obtiene una evolución de la salida (vehículos eléctricos en funcionamiento) de un 18%, es decir, una baja sensibilidad.

A continuación se ha analizado a la sensibilidad frente a valores del número de estaciones de intercambio de baterías dispares. En este caso se van a analizar el caso previsible, el caso con un 50% más de estaciones, y el caso con un 50% menos.

La sensibilidad de las estaciones se muestra en la figura

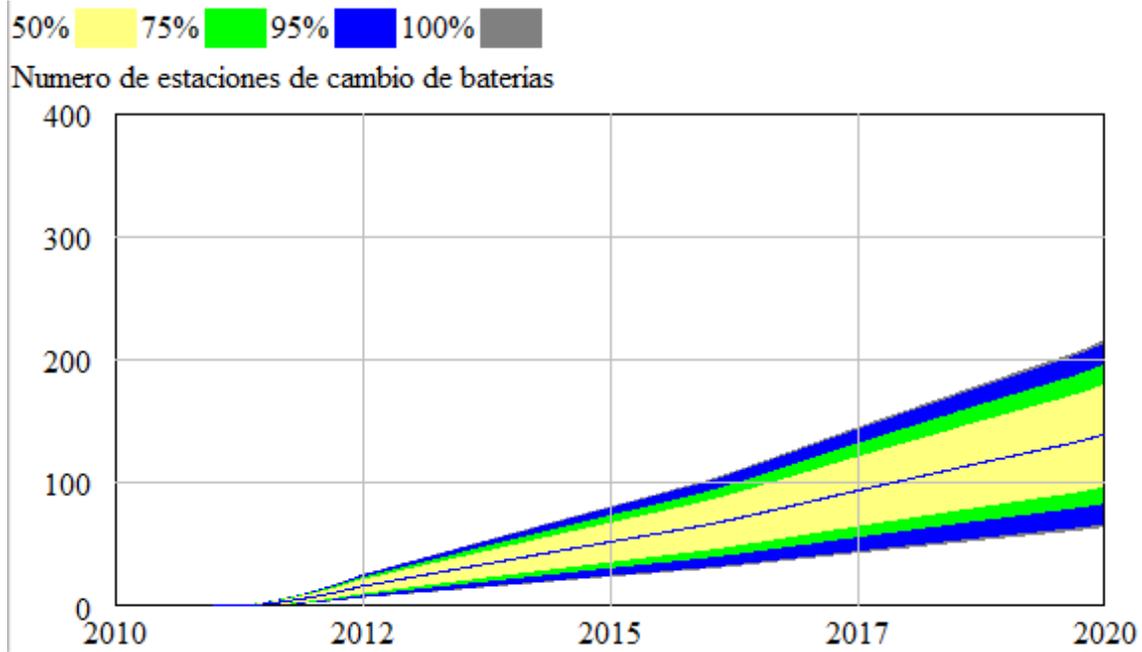


Figura 157: Análisis de sensibilidad de la entrada número de estaciones de intercambio.

obteniendo una salida de vehículos eléctricos

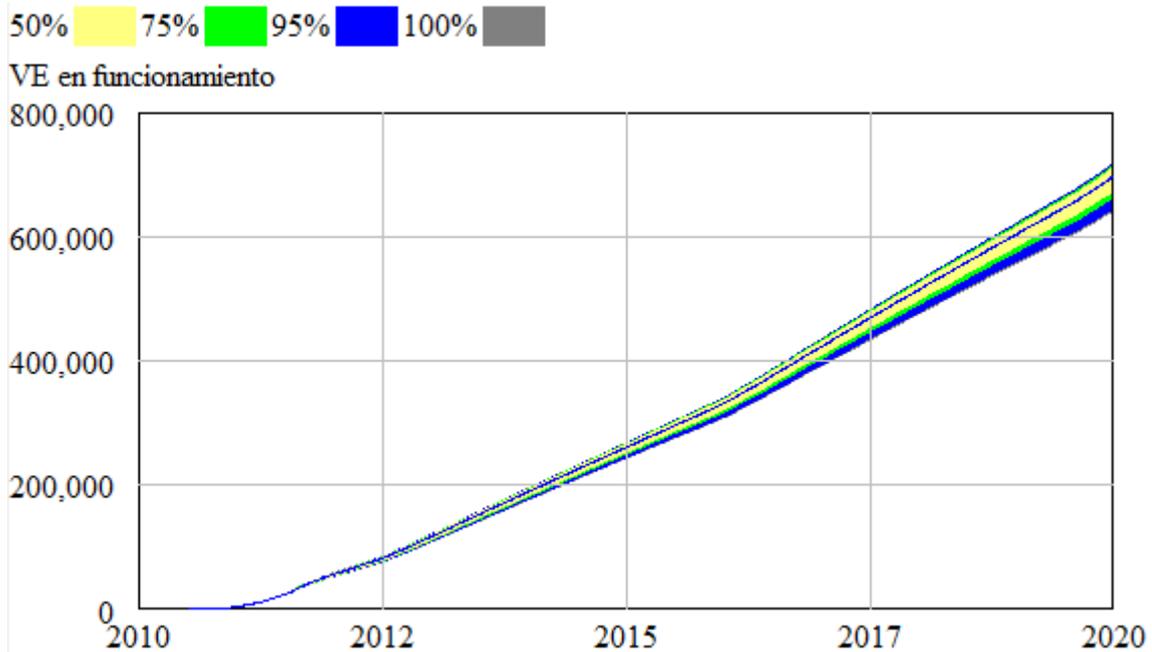


Figura 158: Análisis de sensibilidad de la salida número de vehículos eléctricos.

Se puede ver claramente, que para unos valores de variación de la entrada de un 50%, se obtienen valores con poca variación de la salida de alrededor de un 8%, con lo que se concluye que la sensibilidad del modelo a esta variable es baja.

El siguiente análisis de sensibilidad corresponde con las subvenciones a la compra que pueda entregar el Gobierno. Para el estudio de sensibilidad de este parámetro se han empleado valores de entre 2.000 euros y 20.000 euros de subvención como se muestra en la siguiente figura.

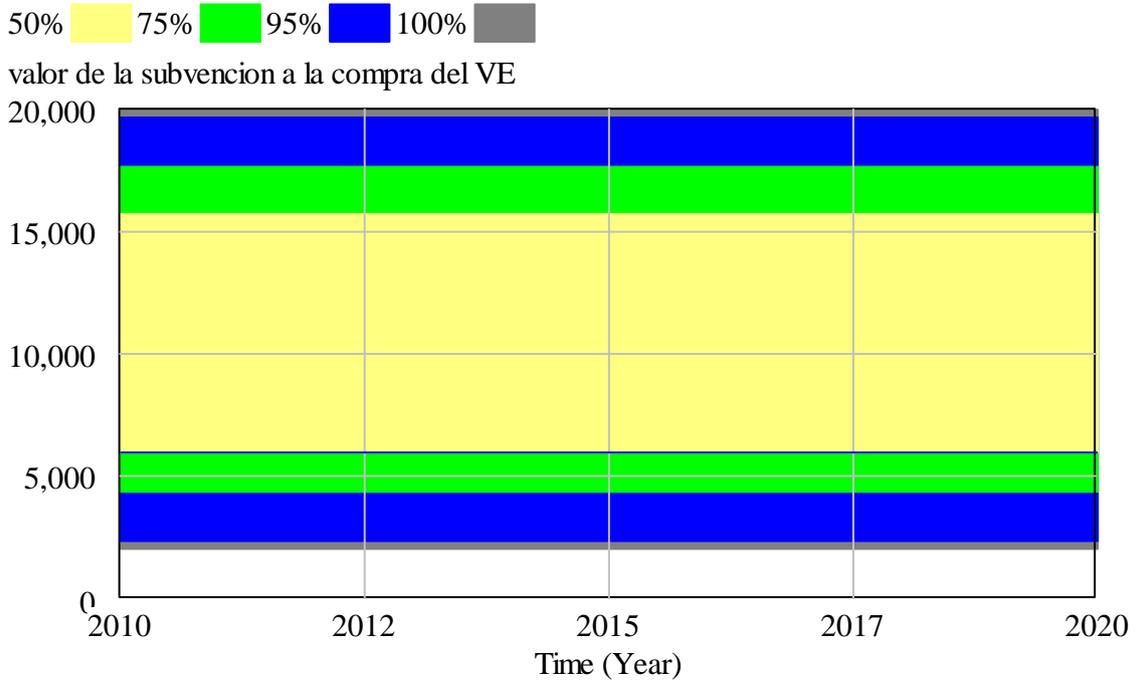
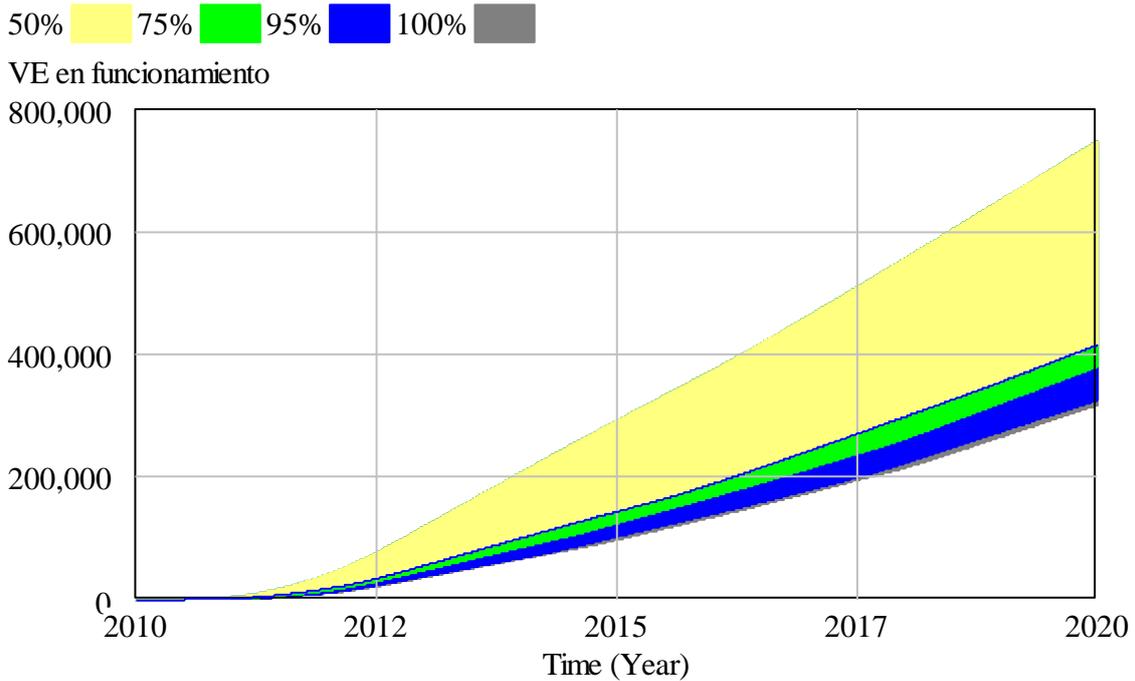


Figura 159: Análisis de sensibilidad de la entrada subvención a la compra de vehículos eléctricos.

Para estas variaciones de subvención se obtiene unas grandes variaciones de vehículos eléctricos en funcionamiento en el año 2020.



**Figura 160: Análisis de sensibilidad de la salida vehículos eléctricos.**

En este caso las variaciones son muy superiores a los casos estudiados anteriormente lo que indica que el valor de la subvención a la compra del vehículo eléctrico va a ser un valor muy importante dentro del modelo y por tanto alterará notablemente los resultados de las simulaciones.

También se ha estudiado la sensibilidad del modelo a las variaciones en el precio del petróleo con una variación el 50% tanto superior como inferior al valor estudiado en el modelo base.

Según esto existe una variación bastante importante en los vehículos eléctricos en funcionamiento en el año 2020 como se muestra a continuación.

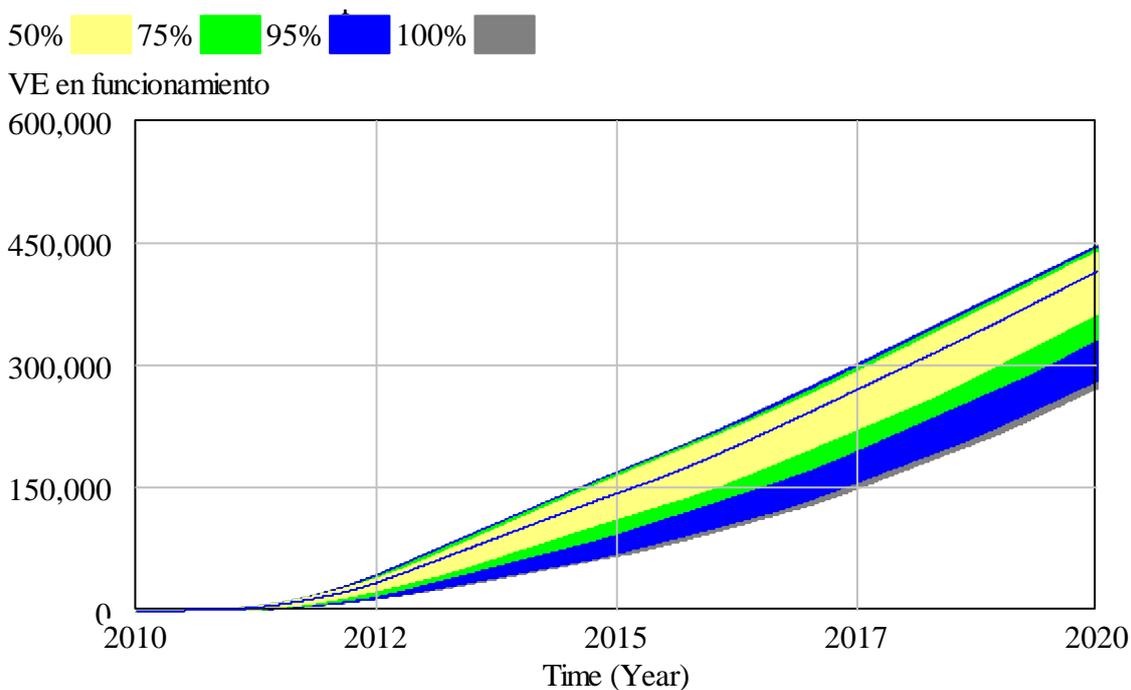


Figura 161: Análisis de sensibilidad de la salida vehículos eléctricos.

Con variaciones en los resultados de más de un 50%.

Por último, se ha estudiado las variaciones del modelo también al precio de la electricidad. Al igual que se ha realizado con el petróleo se ha variado el precio de la electricidad en un 50% de manera superior e inferior respecto al valor base obteniendo los siguientes resultados.

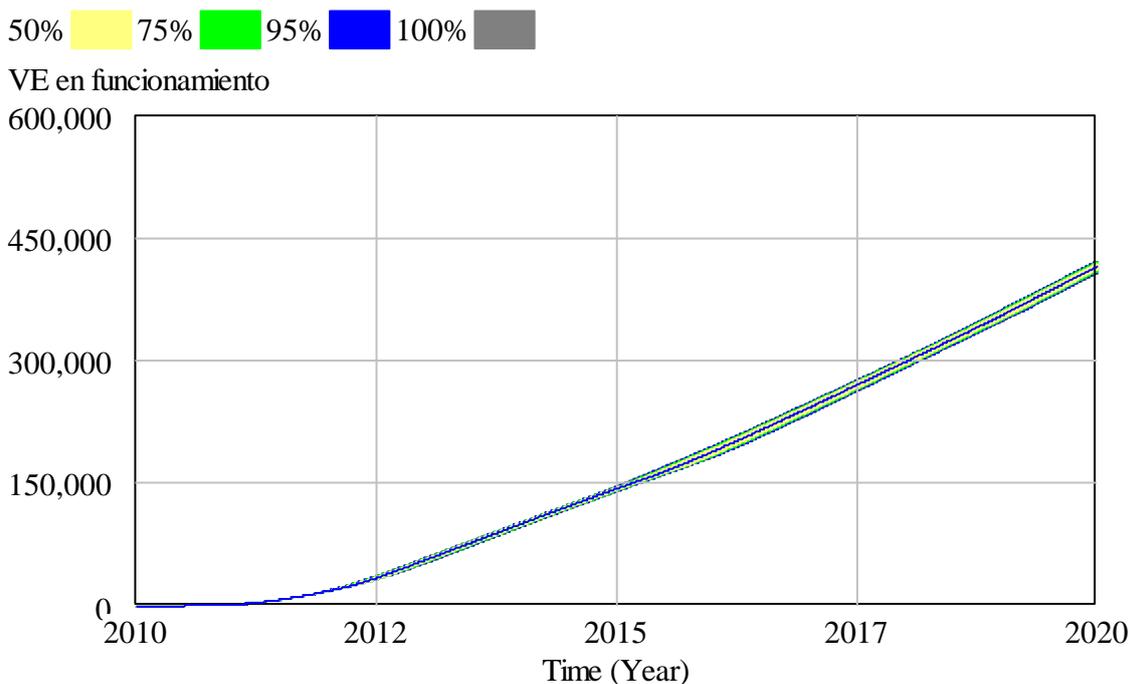


Figura 162: Análisis de sensibilidad de la salida vehículos eléctricos.

A diferencia de lo que ocurría con el precio del petróleo, la sensibilidad del sistema con respecto al precio de la electricidad es mínima, lo que detona que el factor clave en cuanto a combustibles se refiere en el modelo es el petróleo.

Vistos los resultados de los análisis de sensibilidad de las diferentes variables, se puede determinar que el modelo es muy sensible a los valores de las subvenciones de compra que el Gobierno aplique y al precio del petróleo, y poco sensible al coste y autonomía de la batería, al número de estaciones de intercambio de baterías y al precio de la electricidad.

## **8.2 Escenario base**

El primer escenario a estudiar corresponde con el modelo según los datos que se conocen en la actualidad, es decir, un modelo previsional en cuanto a la evolución prevista de las baterías, así como la no implantación de estaciones de intercambio de batería, y con una previsión de coste de batería media. Se puede decir que es el estado de referencia. Para combinar con estos datos, se asume que las subvenciones del Gobierno, van a ser las conocidas a día de hoy, es decir, 6.000 € a la compra de un vehículo eléctrico y 2.000 € para la instalación de un punto de recarga, pero sólo hasta el 2010 [Idae09b].

En esta hipótesis de partida, los resultados (hablando en términos del año 2020) son los siguientes:

Los valores de capacidad y de autonomía han seguido las curvas previsionales, alcanzando cifras próximas a 27 kWh, con una autonomía de aproximadamente 270 km.

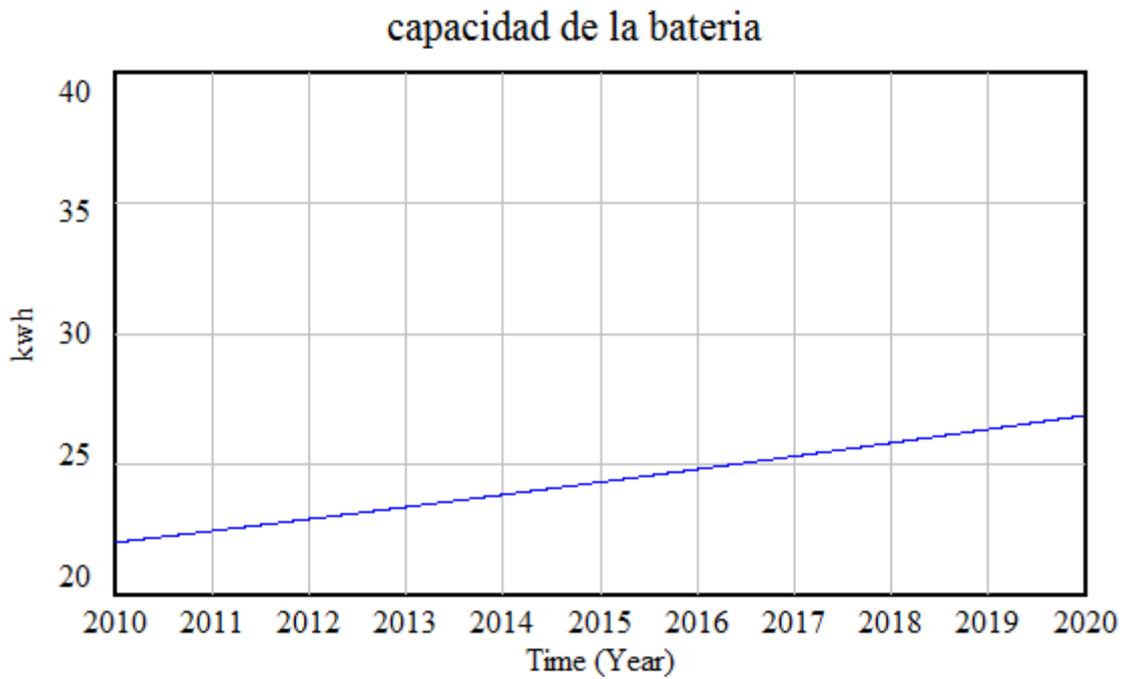


Figura 163: Evolución de la capacidad de la batería en el escenario base.

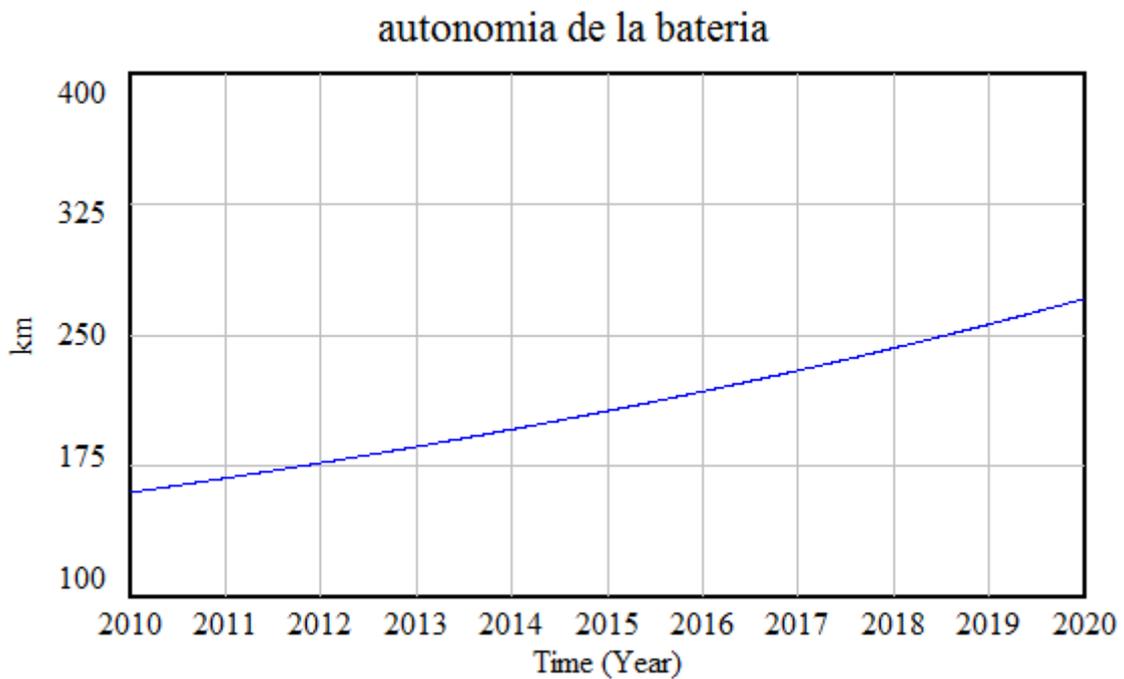
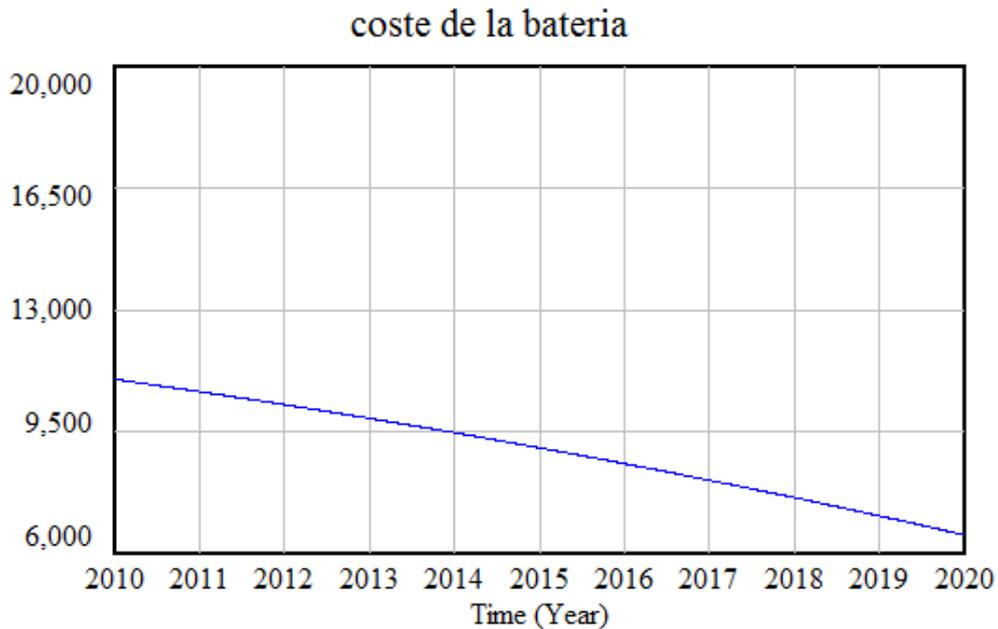


Figura 164: Evolución de la autonomía en el escenario base.

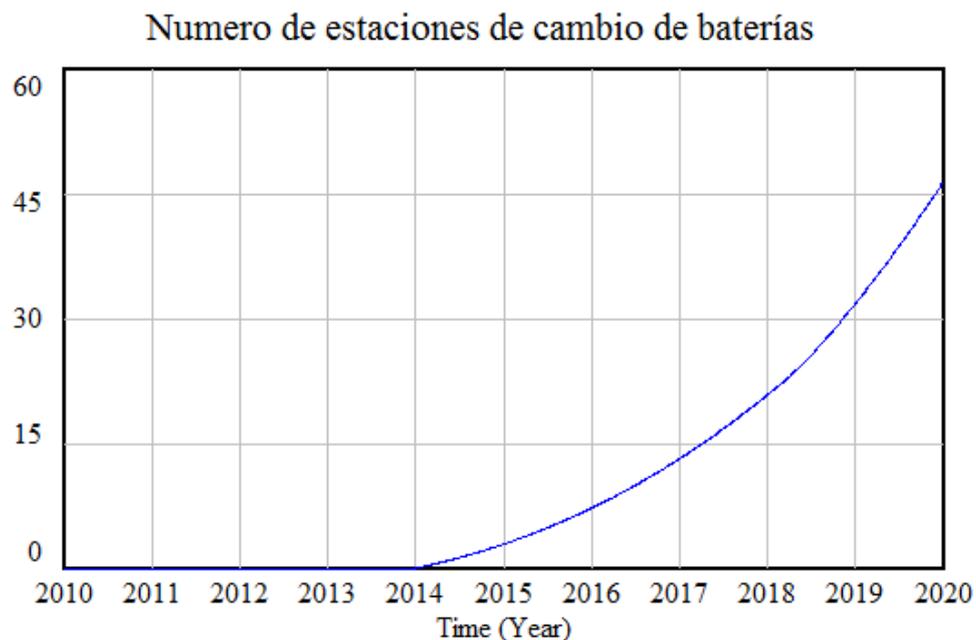
Se puede observar cómo la curva de la autonomía tiene una pendiente ligeramente superior a la de la capacidad, puesto que también influye en ella, la reducción en el consumo de los vehículos eléctricos.

En cuanto al coste de la batería, según la previsión media, en el 2020 el coste del kWh será cercano a 243 € [Hensley09], lo que implicará que la batería completa costará aproximadamente 6.500 €.



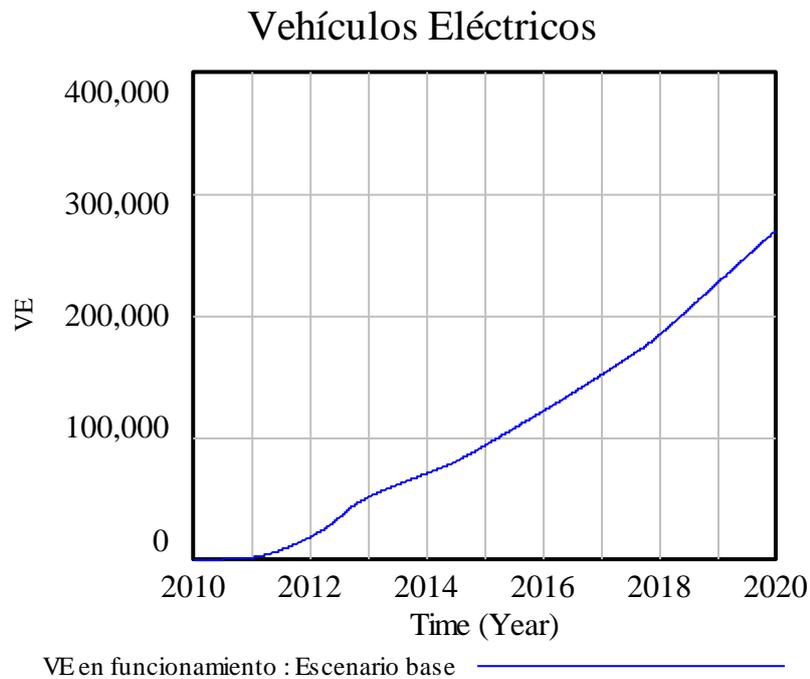
**Figura 165: Previsión del descenso de la batería en el escenario base.**

El número de estaciones de intercambio de baterías, será el estimado que se muestra en la siguiente figura.



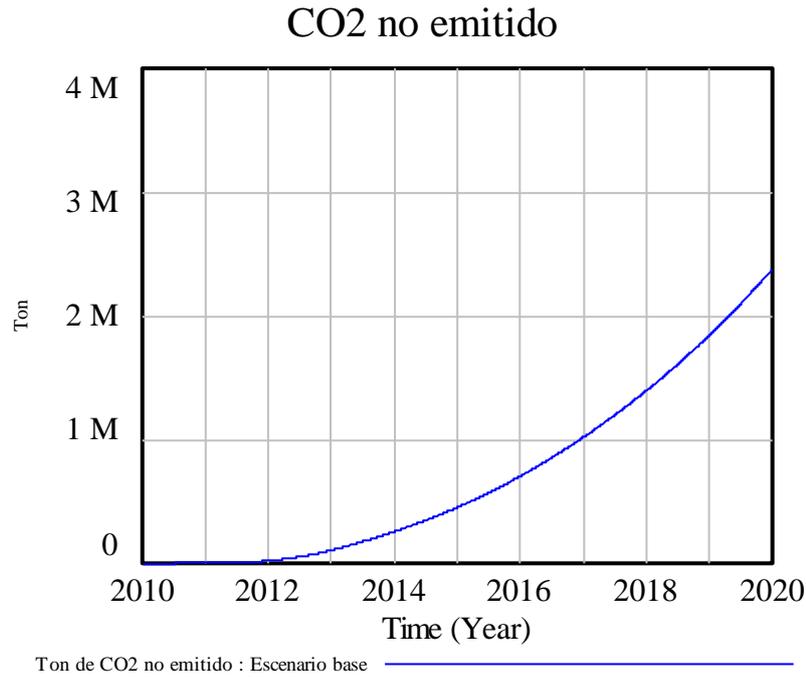
**Figura 166: Previsión de estaciones de intercambio de baterías en el escenario base.**

Partiendo de la hipótesis actual de subvenciones, se determina que cuando finalice el presupuesto dado por el IDAE, no se entregarán más subvenciones, con lo que el gasto del Gobierno en este tipo de subvenciones será muy limitado en el tiempo. Según el modelo y con las previsiones medias en todos los campos, se obtiene que el número de vehículos en 2020 serían del orden de 250.000.



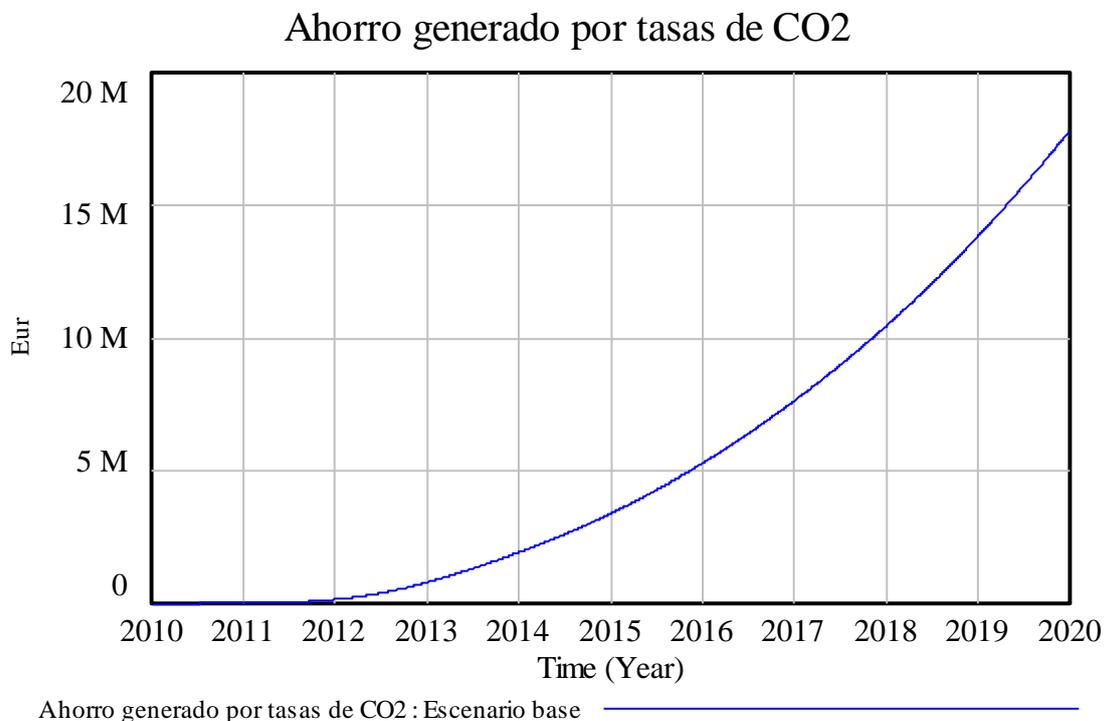
**Figura 167: Número de vehículos eléctricos en funcionamiento en el escenario base.**

Lo cual implicará una cantidad de toneladas de CO<sub>2</sub> no emitidas a la atmósfera de algo más de 2 millones en el año 2020.



**Figura 168: Toneladas de CO<sub>2</sub> no emitidas en el escenario base.**

Estas emisiones de CO<sub>2</sub> no emitidas implican el ahorro económico que se puede ver en la siguiente gráfica con los valores de las tasas explicadas con anterioridad.



**Figura 169: Ahorro económico por las toneladas de CO<sub>2</sub> no emitidas en el escenario base.**

Se puede observar como el ahorro económico obtenido por las no emisiones de CO<sub>2</sub> queda muy lejos del gasto que el Gobierno ha realizado para obtener dicho ahorro.

### 8.3 Escenarios de evolución de la capacidad de la batería

Los siguientes escenarios a tratar son los correspondientes a la evolución tecnológica que pueda existir en cuanto al aumento de la capacidad de la batería previsto. Es clave destacar que en estos escenarios sólo se va a modificar la capacidad de la batería y no su coste por kWh que se ha mantenido constante. Este dato será muy significativo a la hora de entender los resultados.

Inicialmente, se utilizó un escenario base de una mejora del 2% anual [Bandivadekar08] en la capacidad de la batería. Ahora se contemplan dos escenarios, uno optimista con una mejora en la capacidad de un 4% anualmente, y uno pesimista con una mejora de solamente un 1% anual. En la siguiente figura se recoge la capacidad de la batería en los tres escenarios tratados.

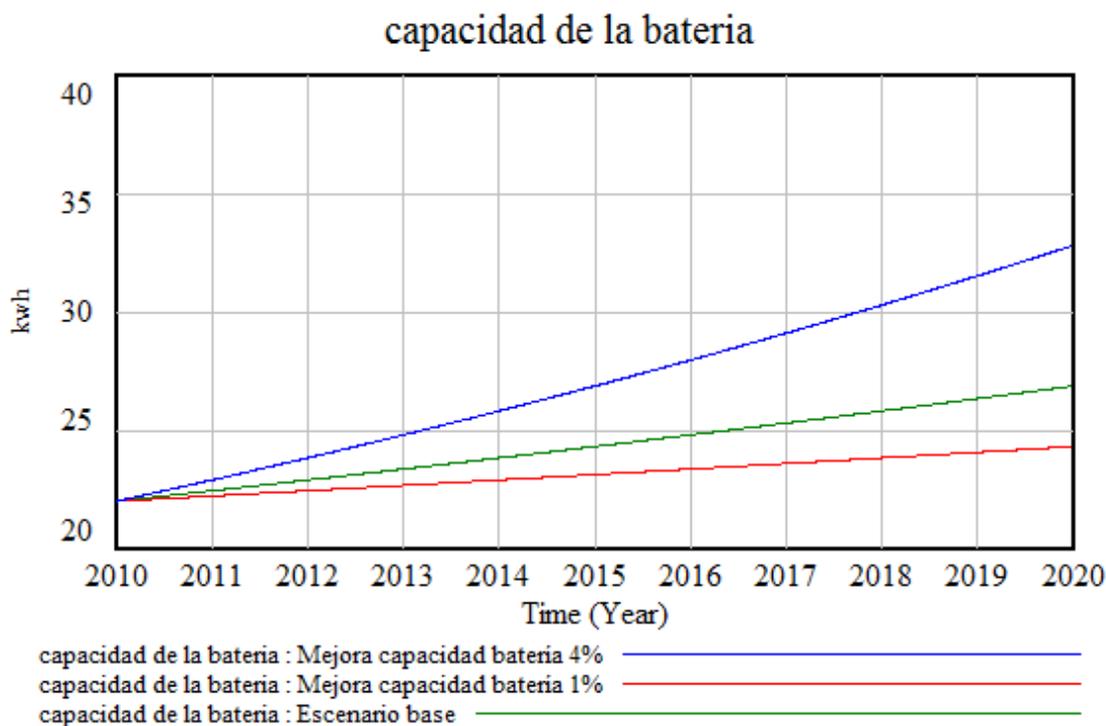
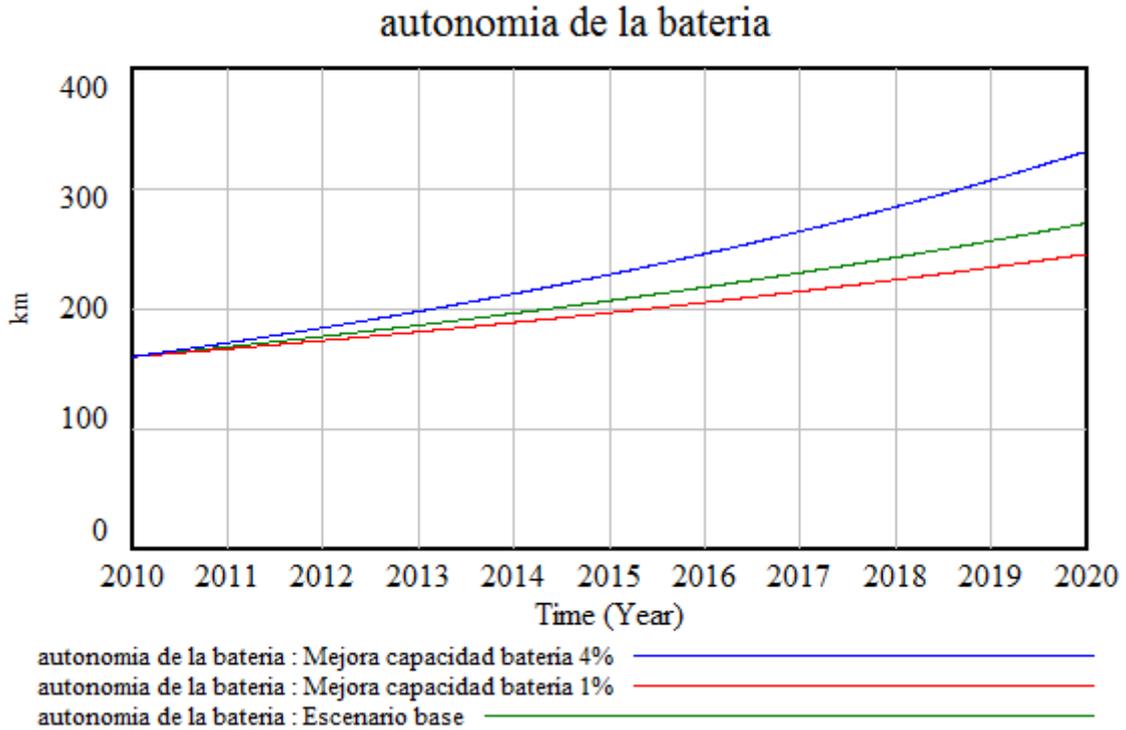


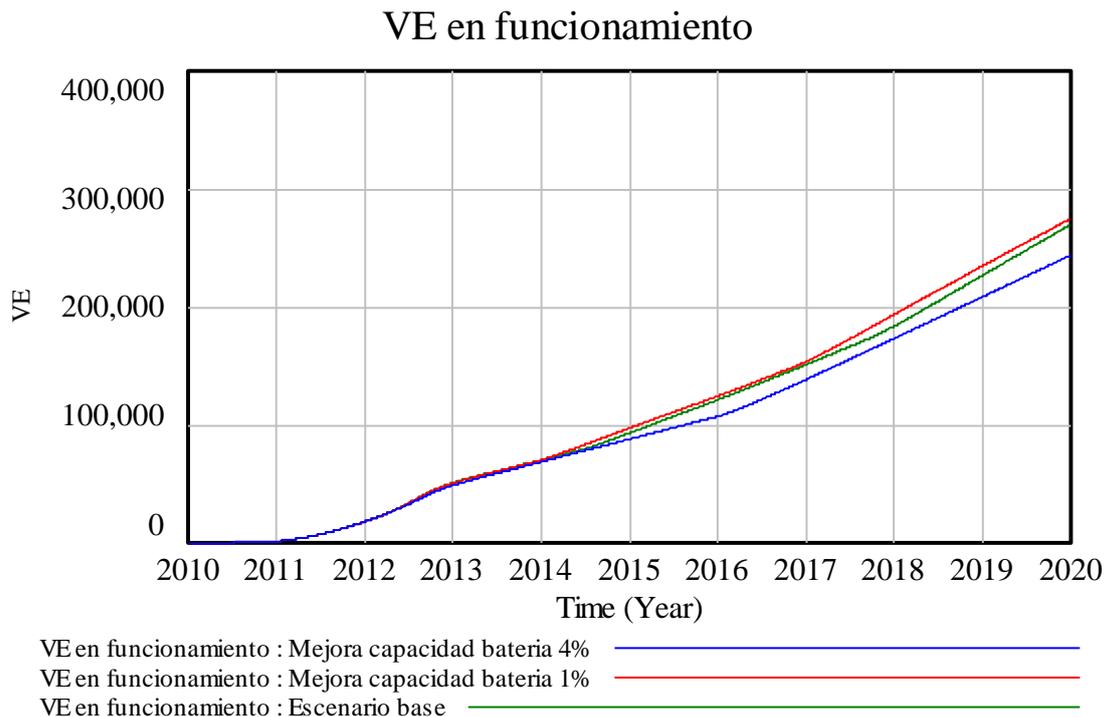
Figura 170: Escenarios de mejora de capacidad de la batería.

A la vista de las capacidades también se puede obtener la autonomía de la que los vehículos eléctricos van a disponer, variando los valores para el año 2020 entre 245 y 330 kilómetros de autonomía, dependiendo del escenario.



**Figura 171: Mejora de la autonomía en función de los escenarios de capacidad de la batería.**

Sin modificar la consideración del modelo base en cuanto a subvenciones económicas que el Gobierno entrega, el número de vehículos eléctricos será:

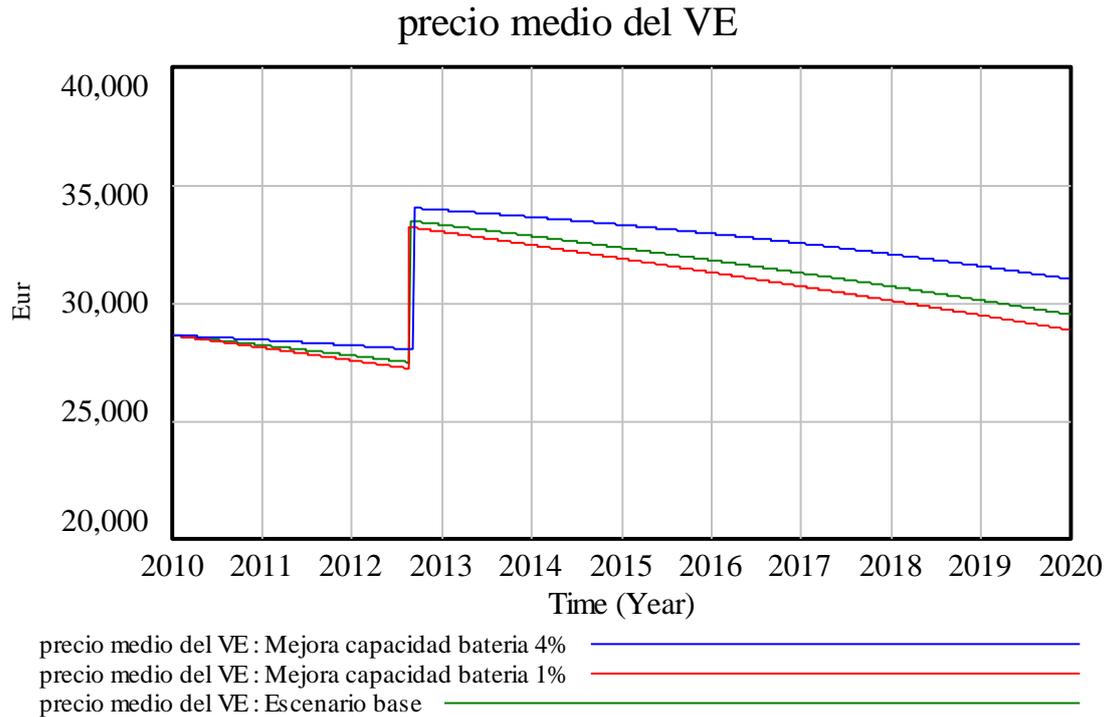


**Figura 172: Número de vehículos eléctricos para los escenarios de mejora de capacidad de la batería.**

El resultado que se obtiene es muy interesante. Pese a lo que pueda parecer antes de analizar los resultados, es de suponer que un aumento en la capacidad de la batería, que implicará un aumento en la autonomía del vehículo eléctrico debería aumentar la demanda del mismo. No obstante si se analizan los resultados se ve claramente que esto no es así, sino todo lo contrario.

Si bien es cierto que el consumidor potencial del vehículo eléctrico se siente inquieto por la autonomía del vehículo eléctrico, le preocupa en mayor medida el coste que el vehículo pueda tener. Como se explicó con anterioridad, el coste de la batería es el principal factor negativo económicamente hablando que el vehículo eléctrico posee. El precio de la batería siempre está relativizado al precio por kWh, por lo que si la batería aumenta de capacidad, pero el precio por kWh no se reduce en proporción similar, el vehículo eléctrico no sólo no ganará en atractivo al público, sino que al contrario, lo perderá. De hecho en estos escenarios, el precio del kWh se ha mantenido constante.

En la siguiente figura se pueden ver los precios medios del vehículo eléctrico en los diversos escenarios:



**Figura 173: Precio medio del vehículo eléctrico en los escenarios de mejora de la capacidad de la batería.**

Como se puede comprobar, el precio del vehículo eléctrico desciende en todos los escenarios, pero la “contraprestación” de un menor aumento de la capacidad de la batería implica que el precio descienda en mayor o menor medida.

Otro concepto que justifica estos resultados, es la utilidad que el vehículo eléctrico va a tener. En estos primeros tiempos de comercialización masiva del vehículo eléctrico, éste está pensado para ser un vehículo de ciudad, es decir, no será utilizado de manera habitual para realizar viajes largos. Según esto, un consumidor de un vehículo eléctrico, va a preferir un vehículo que tenga algo menos de autonomía, pero que para sus viajes cotidianos le va a servir, frente a un vehículo con más autonomía, pero que también es más caro. Para comprar un coche con más autonomía, se va a decantar por un vehículo convencional.

A la vista de estos escenarios se puede concluir que, un aumento de la autonomía del vehículo eléctrico, si no lleva asociado un descenso considerable del precio de la batería, y por consiguiente del vehículo eléctrico, no será beneficioso, sino todo lo contrario.

## Objetivos

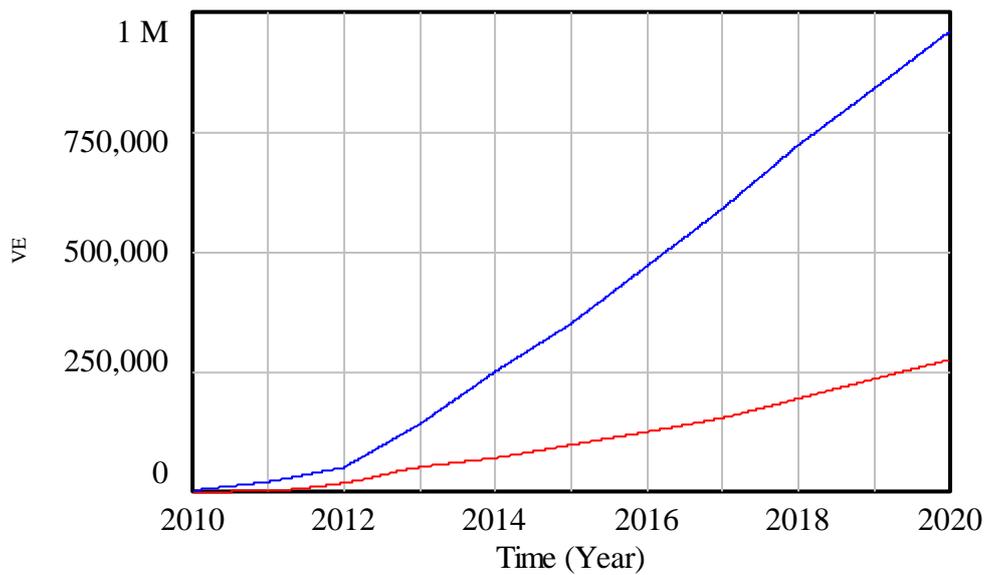
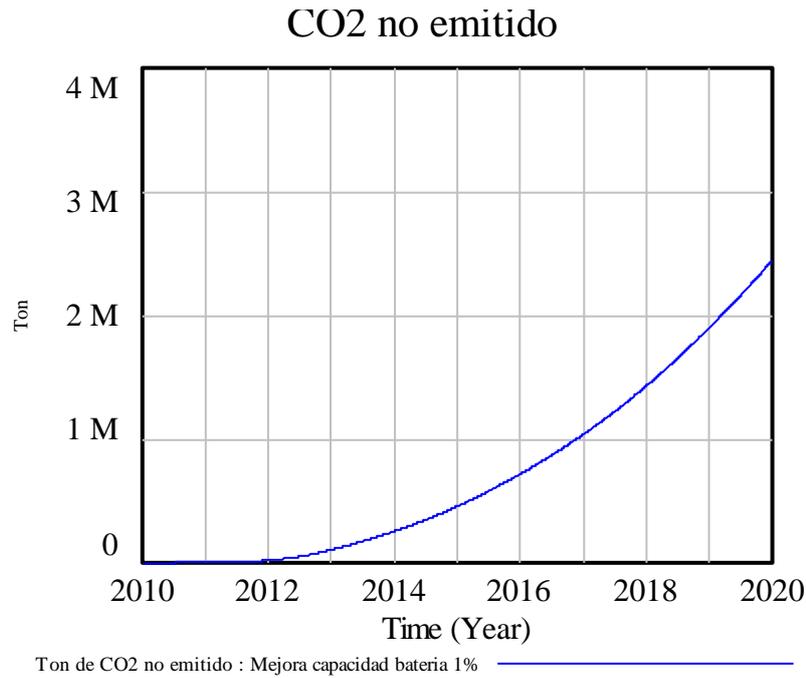


Gráfico de los objetivos de España : Mejora capacidad batería 1% —————  
VE en funcionamiento : Mejora capacidad batería 1% —————

**Figura 174: Comparativa del número de vehículos eléctricos con los objetivos en el escenario de mejora de la capacidad de la batería pesimista con las subvenciones actuales.**

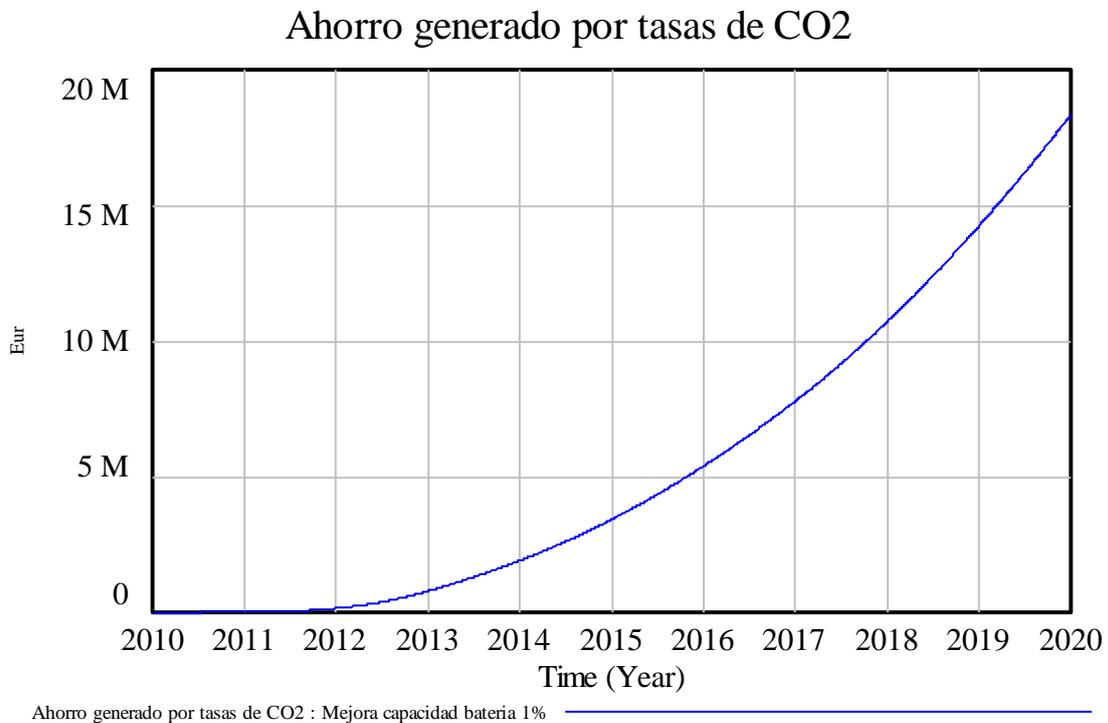
El gasto en subvenciones por parte del Gobierno será de aproximadamente 250 millones de euros que es el valor que se destinó de manera inicial. Una vez que se alcanza ese valor se frena el aporte de subvención a la compra.

En este caso, las emisiones de CO<sub>2</sub> no emitidas en el año 2020 serán algo más de 2 millones como se ve a continuación.



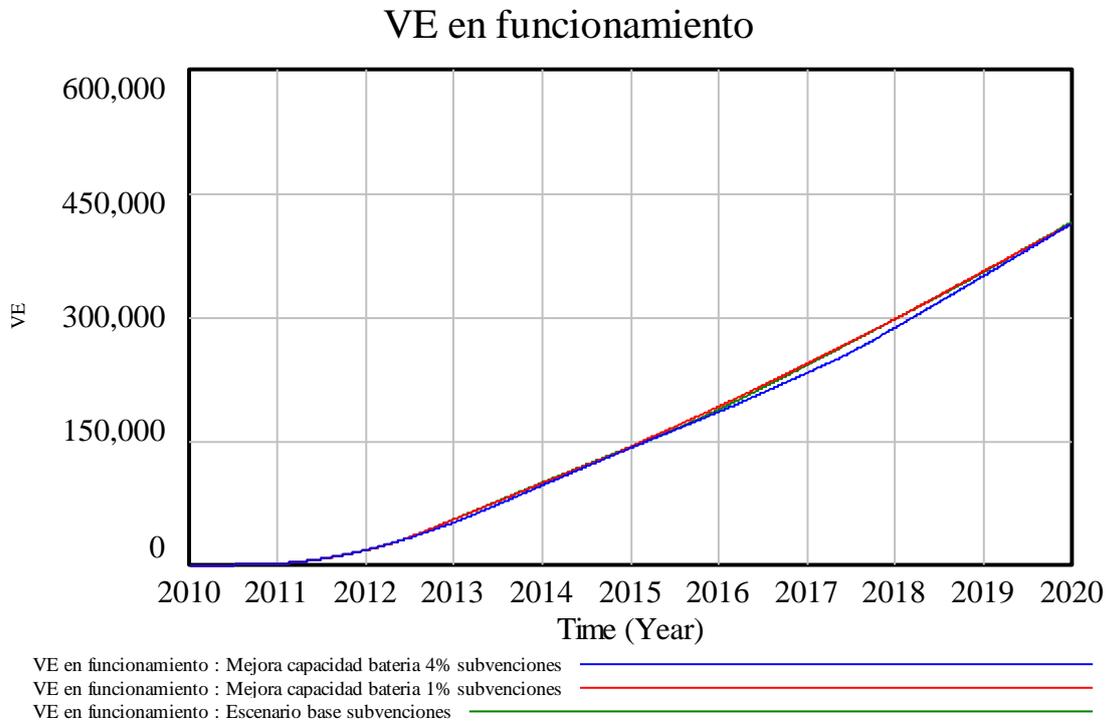
**Figura 175: Toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub> no emitidas en el escenario de mejora de la capacidad de la batería pesimista con las subvenciones actuales.**

Estas emisiones de CO<sub>2</sub> no emitidas suponen un ahorro económico de algo más de 18 millones de euros en el año 2020 como se puede observar en la siguiente gráfica de resultados.



**Figura 176: Ahorro económico obtenido por las emisiones de CO<sub>2</sub> no emitidas en el escenario de mejora de la capacidad**

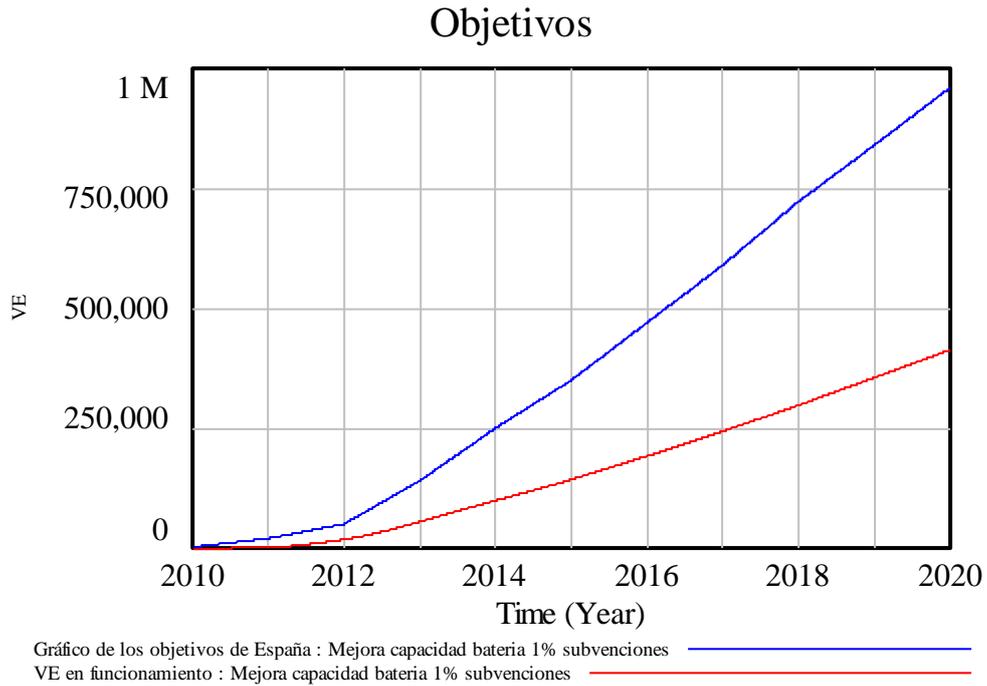
Si se contempla el caso de que el Gobierno prolongue la subvención de 6.000 € en el tiempo, los resultados van a ser distintos, obteniendo valores superiores a los 400.000 vehículos eléctricos en el año 2020.



**Figura 177: Número de vehículos eléctricos en los escenarios de aumento de capacidad de la batería, sin disminuir la subvención a la compra.**

Como se puede observar en el resultado, los tres escenarios generan resultados prácticamente idénticos con unos valores de subvenciones significativos hasta el año 2020. Esto es motivado por el gran peso que tiene el aspecto económico frente al resto de aspectos del vehículo eléctrico. Al continuar las subvenciones a la compra hasta el año 2020 las diferencias que existían entre los escenarios sin subvenciones prácticamente desaparecen.

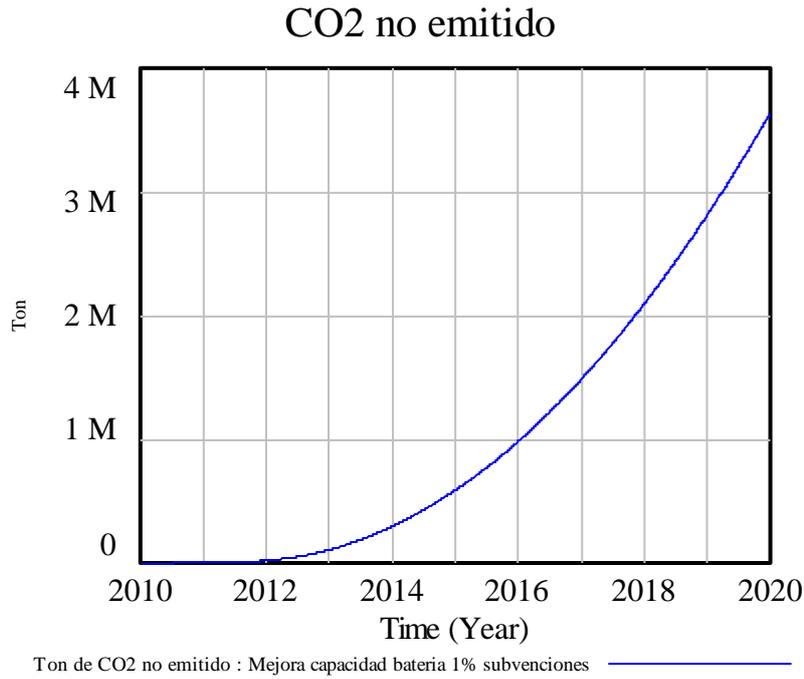
Al comparar el valor del escenario más favorable (el del menor aumento de la autonomía) con los del objetivo del Gobierno se puede ver que en ningún caso se obtiene un valor ni siquiera próximo a los objetivos que fijó el Gobierno en su momento.



**Figura 178: Comparativa del número de vehículos eléctricos con los objetivos en el escenario de mejora de la capacidad de la batería pesimista sin reducir las subvenciones.**

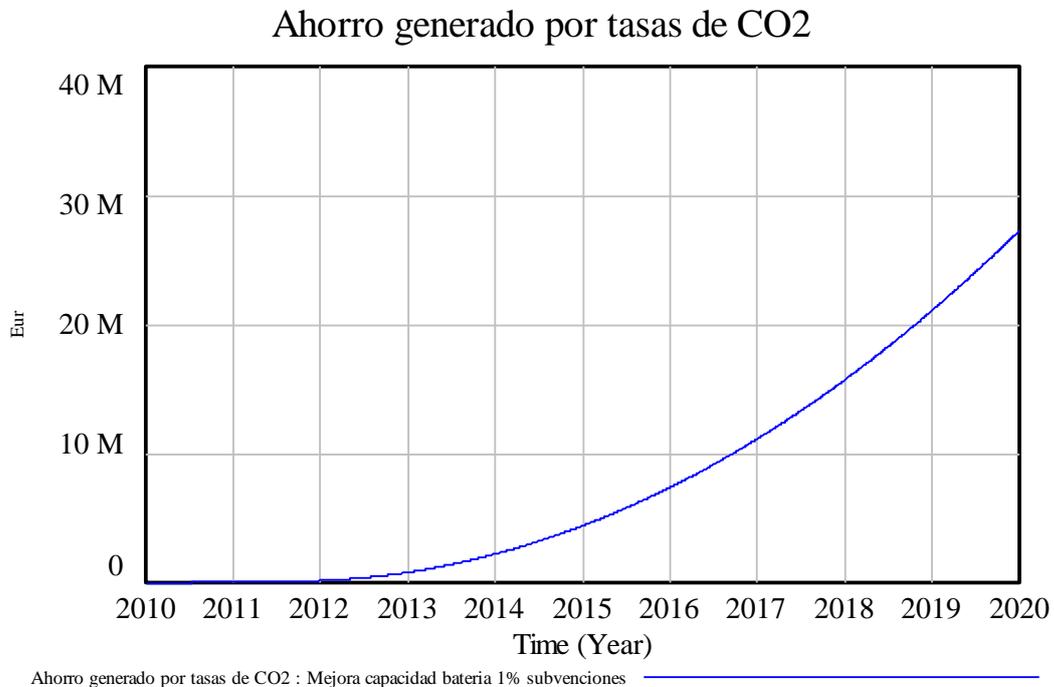
Esto indica que para estos escenarios de evolución de la capacidad de la batería o bien aumentan considerablemente los valores de las subvenciones que se otorgan o en ningún caso se alcanzarán ni remotamente los objetivos fijados.

En este caso las emisiones de CO<sub>2</sub> no emitidas en el año 2020 serán de un valor cercano a los 4 millones de toneladas.



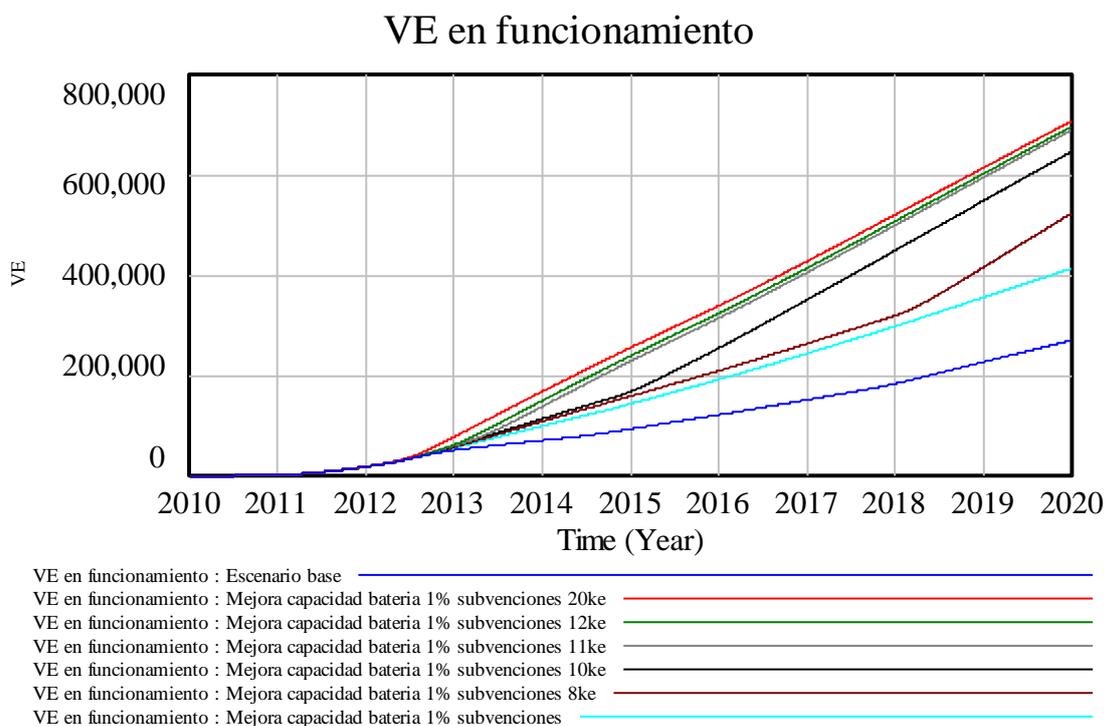
**Figura 179: Toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub> no emitidas en el escenario de mejora de la capacidad de la batería pesimista sin reducir las subvenciones.**

Este valor de emisiones convertido a nivel económico da unos resultados cercanos a los 30 millones de euros.



**Figura 180: Ahorro económico por las emisiones de CO<sub>2</sub> no emitidas en el escenario de mejora de la capacidad de la batería pesimista sin reducir las subvenciones.**

Al analizar los datos de subvenciones a la adquisición con los que se podría variar el atractivo que tendría el vehículo eléctrico para el potencial consumidor se han obtenido varias simulaciones en las que se puede ver la evolución de los vehículos eléctricos en funcionamiento, atendiendo al valor de la subvención en el momento de la adquisición del vehículo eléctrico.



**Figura 181: Comparativa del número de vehículos eléctricos en el escenario de mejora de la capacidad de la batería pesimista con diferentes valores de subvención.**

Para la obtención de la gráfica anterior se han utilizado diversos valores de subvención a la compra: 6.000 €, 8.000 €, 10.000 €, 11.000 €, 12.000 € y 20.000 €.

Como era de esperar, el valor de la subvención va a ser muy determinante en el resultado obtenido. Pero a partir de un cierto valor, el resultado que se obtiene no es tan proporcional como cabría esperar. Con valores de subvención de 6.000, 8.000 y 10.000 € sí que se observan saltos importante entre sus curvas de resultados de vehículos eléctricos en funcionamiento, pero a partir de los 10.000 €, pese a haber aumentado la cuantía de la subvención no se observan variaciones en los resultados tan importantes como en los casos anteriores. En la siguiente tabla se puede ver los resultados en 2020 en función de la cuantía de la subvención.

SUBVENCIÓN A PARTIR 2013	VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN 2020
6.000 €	413.000
8.000 €	523.000
10.000 €	646.000
11.000 €	689.000
12.000 €	696.000
20.000 €	707.000

Tabla 22: Número de vehículos eléctricos en el 2020 en función del valor de la subvención.

Según estos datos, la subvención que permitiría optimizar los resultados en este escenario sería la de 10.000 €. No obstante, a pesar de utilizar esta subvención no se alcanzarían los objetivos fijados por el Gobierno para 2020 como se observa en la siguiente figura.

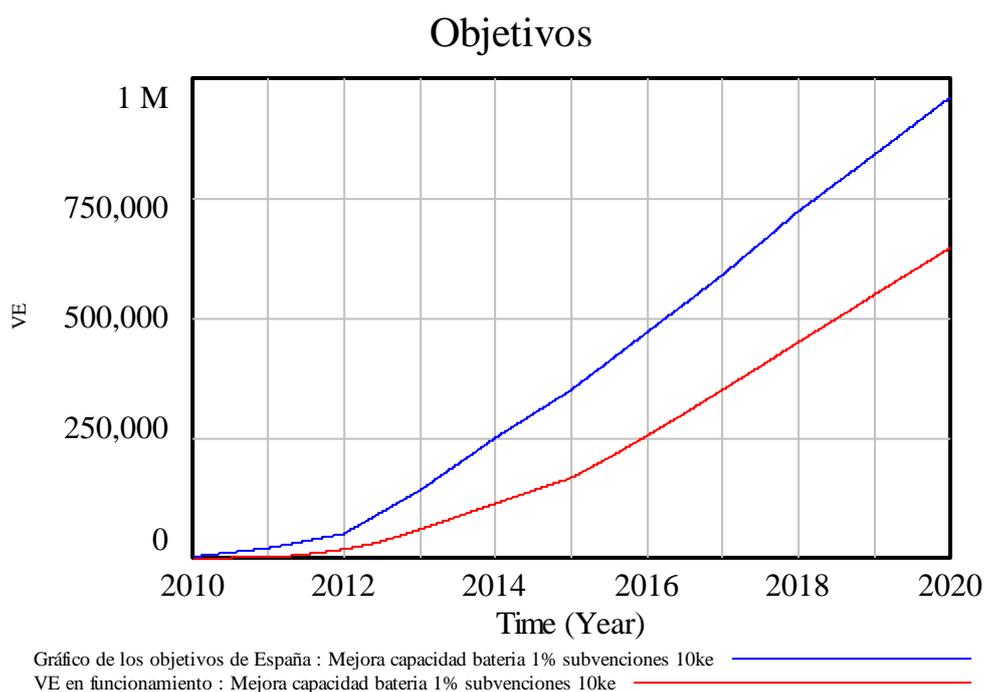
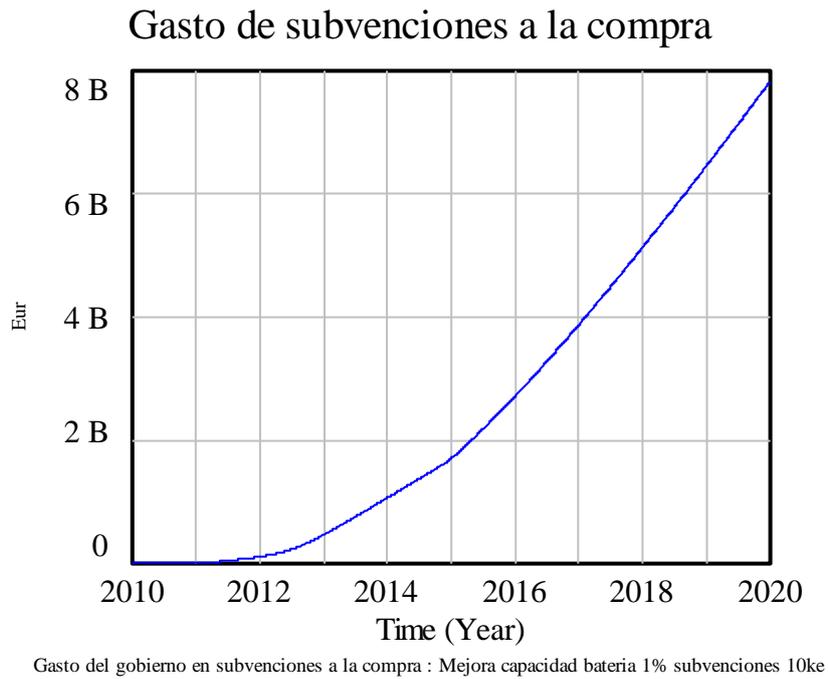


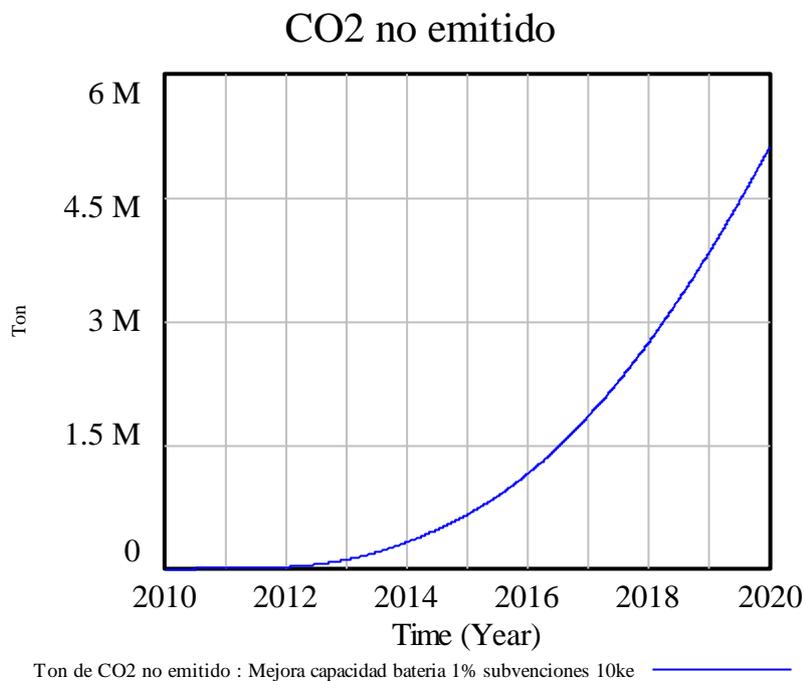
Figura 182: Comparativa del número de vehículos eléctricos con los objetivos en el escenario de mejora de la capacidad de la batería pesimista con subvenciones de 10.000 €.

En la siguiente gráfica se puede ver el gasto que tendría que realizar el Gobierno para lograr estos valores teniendo en cuenta la subvención fijada, que ascienden a casi 8.000 millones de euros.



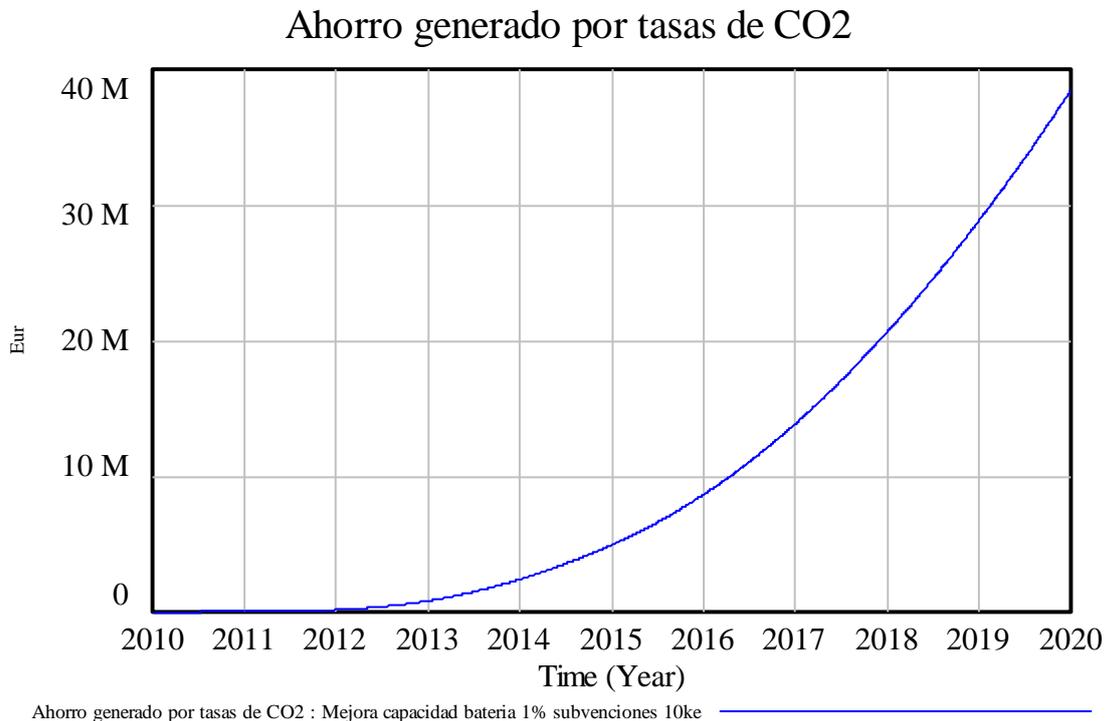
**Figura 183: Gasto total del Gobierno en subvenciones en el escenario de mejora de la capacidad de la batería pesimista con subvenciones de 10.000 €.**

Logrando una reducción en emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera de más de 5 millones de toneladas como se muestra a continuación.



**Figura 184: Toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub> no emitidas en el escenario de mejora de la capacidad de la batería pesimista con subvenciones de 10.000 €.**

Con un ahorro económico equivalente

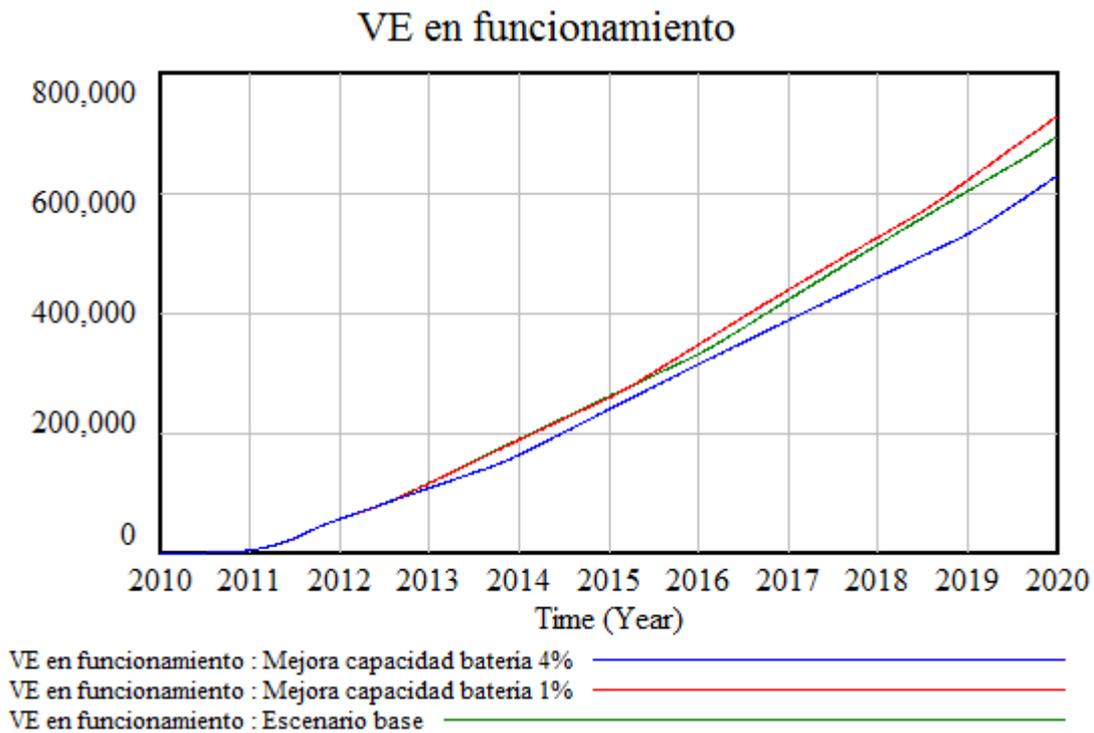


**Figura 185: Ahorro económico obtenido por las emisiones de CO<sub>2</sub> no emitidas en el escenario de mejora de la capacidad de la batería pesimista con subvenciones de 10.000 €.**

Si se analiza exclusivamente de manera económica, la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> con el coste que implica al Gobierno alcanzar dicho valor se determina que no es rentable a nivel económico con los valores de las tasas de CO<sub>2</sub> que se mencionaron anteriormente. Si no se modifican las subvenciones, el Gobierno emplea aproximadamente 250 millones de euros para reducir aproximadamente 2 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>, mientras que para reducir 5 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> son necesarios cerca de 8.000 millones de euros en subvenciones a la compra del vehículo eléctrico. Teniendo en cuenta que la tasa que se ha utilizado para la tesis es de 7,5 € la tonelada de CO<sub>2</sub>, el ahorro que se obtiene es de 40 millones de euros en tasas que no es comparable a lo que tiene que invertir el Gobierno para lograr dicha reducción de emisiones. Tal y como se ha explicado anteriormente, el valor de la tasa es muy fluctuante, pero parece poco probable que se alcance un valor que justifique la inversión económicamente hablando exclusivamente. Esta comparativa se podría realizar en todos los escenarios pero a la vista de los resultados no se considera necesario a tenor de los resultados que se van a ir obteniendo.

Tal y como se ha mencionado en el capítulo anterior, estos resultados obtenidos en las diversas simulaciones chocan bastantes con los resultados que se obtuvieron varios años antes en el transcurso de la investigación, a causa de que inicialmente se trabajaron con datos muchos menos reales, es decir, con muchas más previsiones que en la parte final del trabajo. Como se ha dicho, dentro de los principales ajustes que se hicieron a la realidad, el más significativo fue el que implicó los costes del vehículo eléctrico.

A continuación se van a mostrar los resultados que se obtuvieron con el modelo inicial de 2010 en los escenarios de evolución de la capacidad de la batería y la influencia que el coste de adquisición del vehículo eléctrico tiene en el escenario:



**Figura 186: Número de vehículos eléctricos para los escenarios de mejora de capacidad con el modelo del 2010.**

Al compararlo con los datos obtenidos con el modelo actual, se puede ver que los resultados incluso se duplican. Esto se debe a la diferencia en los precios de adquisición del vehículo eléctrico en ambos modelos como se puede ver en la siguiente imagen:

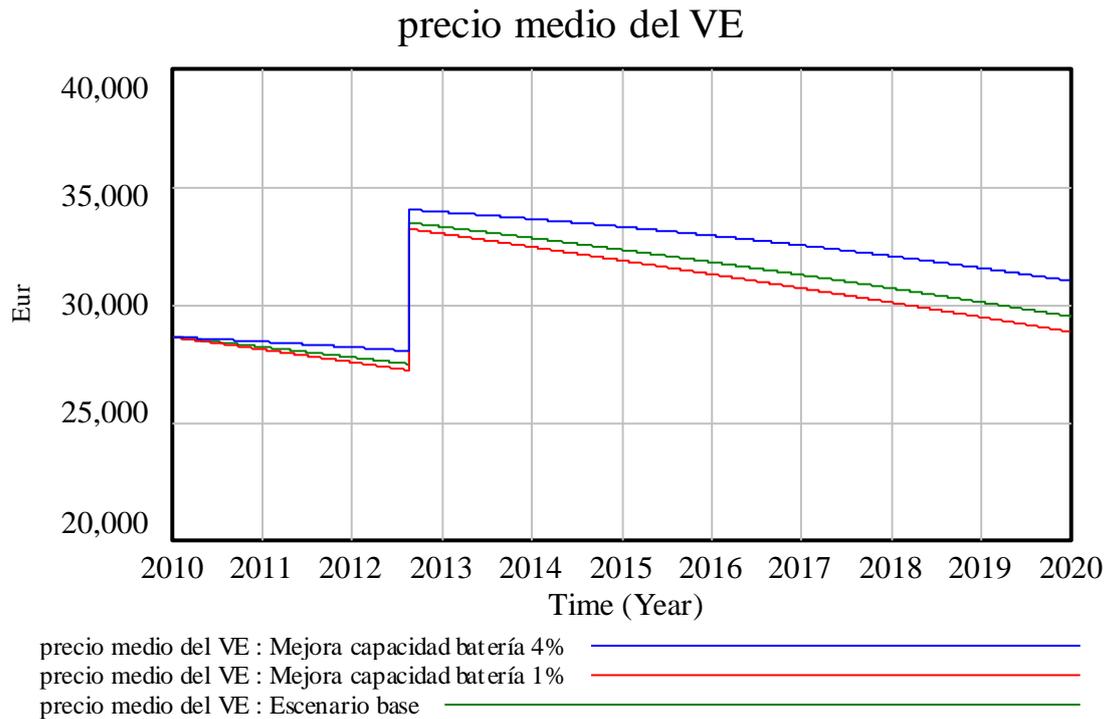


Figura 187: Precio medio de los vehículos eléctricos con el modelo del 2013.

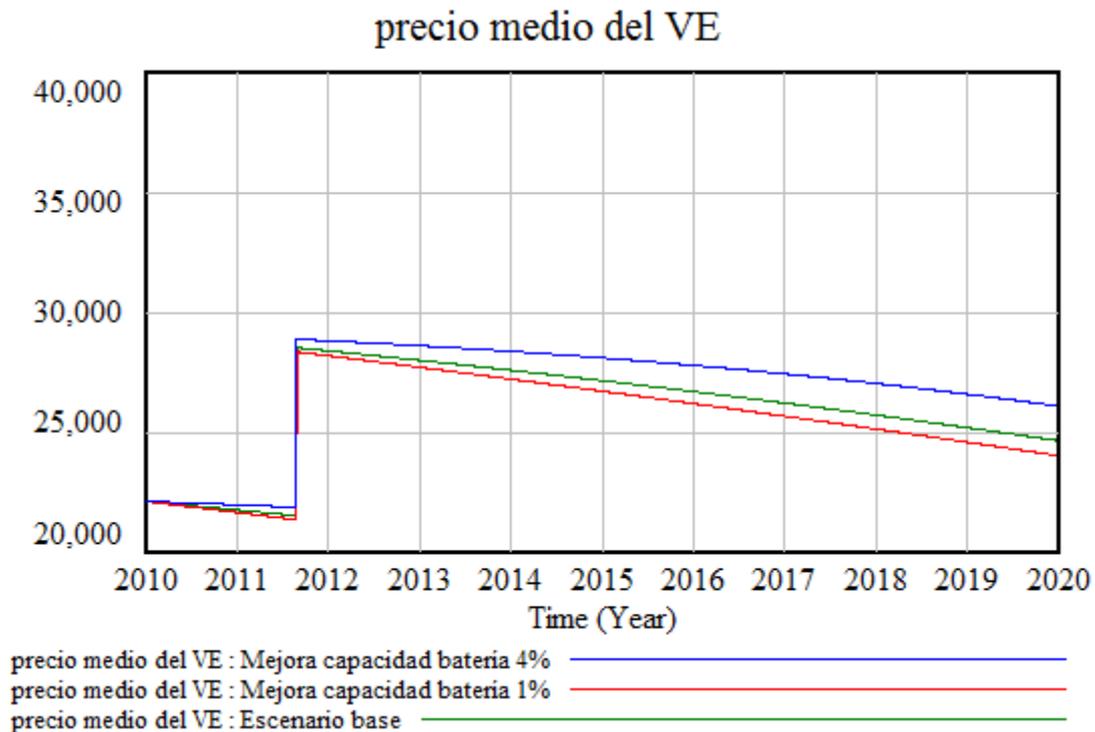
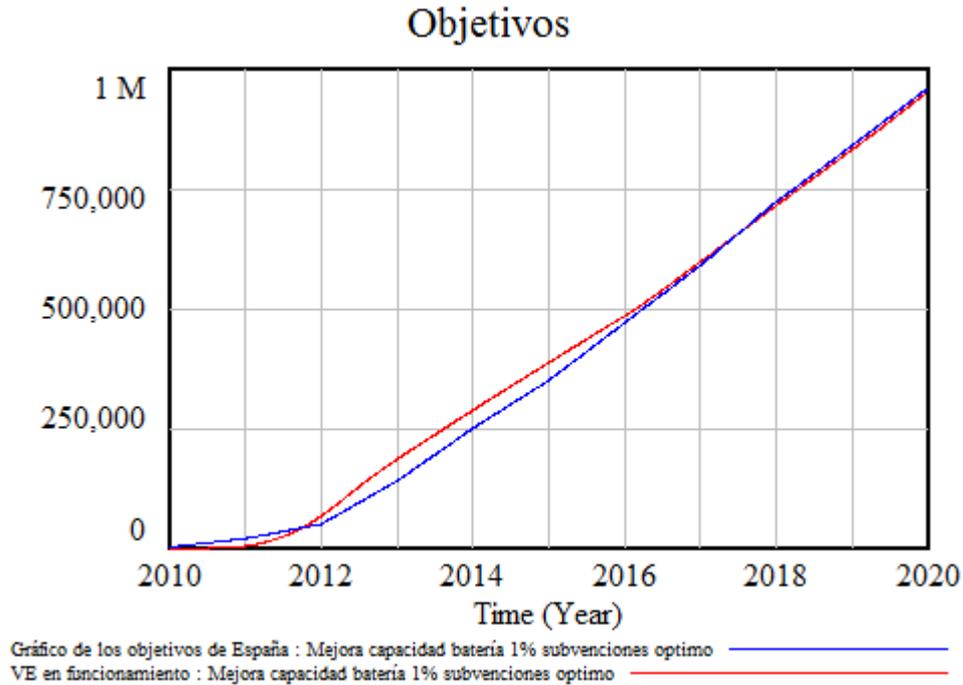


Figura 188: Precio medio de los vehículos eléctricos con el modelo del 2010.

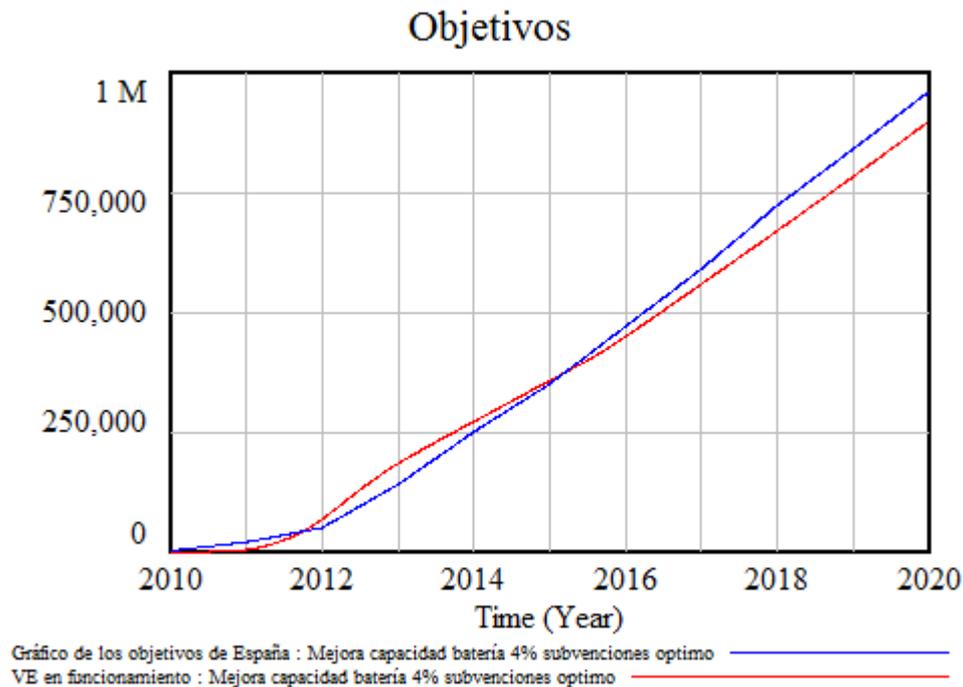
Al comparar ambas gráficas se puede ver el salto económico que existe entre los dos modelos lo que implica una variación muy importante en los resultados. De hecho, en el caso del modelo de 2010 manteniendo las subvenciones, e incluso bajando su

cuantía se logran alcanzar los objetivos fijados por el Gobierno. En la figura siguiente se muestra los resultados que se obtenían con una subvención únicamente de 3.000 € a partir del año 2013 en el escenario más optimista.



**Figura 189: Comparativa del número de vehículos eléctricos con los objetivos en el escenario de mejora de la capacidad de la batería pesimista con subvenciones adaptadas a los objetivos con el modelo del 2010.**

Y también se alcanzan los resultados con una subvención de 3.500 € en el escenario más pesimista.



**Figura 190: Comparativa del número de vehículos eléctricos con los objetivos en el escenario de mejora de la capacidad de la batería optimista con las subvenciones adaptadas a los objetivos del escenario pesimista con el modelo del 2010.**

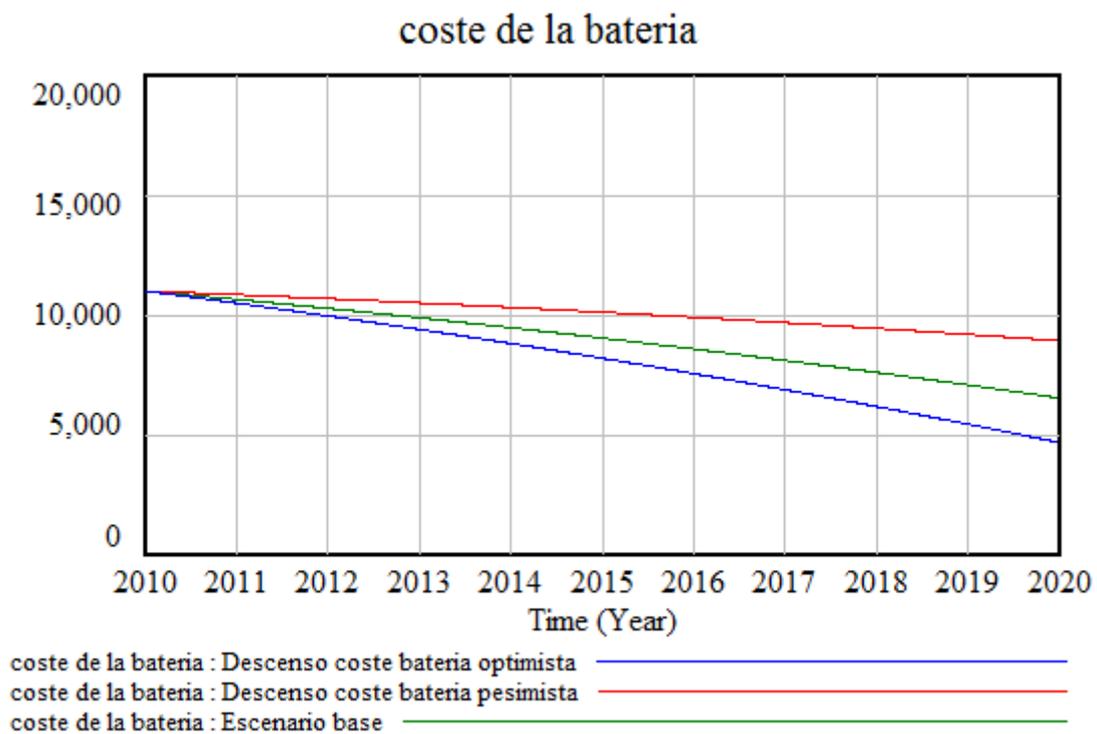
Al poder comparar los resultados de ambos modelos se puede concluir que el precio de adquisición varía enormemente los resultados que se obtienen. Viendo los resultados del modelo del año 2013 se concluye que no se pueden lograr los objetivos fijados por el Gobierno, mientras que en el modelo de 2010 se lograban los objetivos incluso con una subvención reducida, siendo la principal modificación el coste de adquisición del vehículo eléctrico.

#### **8.4 Escenarios de evolución del coste de la batería**

Los siguientes escenarios a estudiar corresponden con la evolución que el coste de la batería va a tener en los próximos. Como se ha visto en los escenarios anteriores, el coste de la batería va a ser determinante en la evolución de la demanda del vehículo eléctrico.

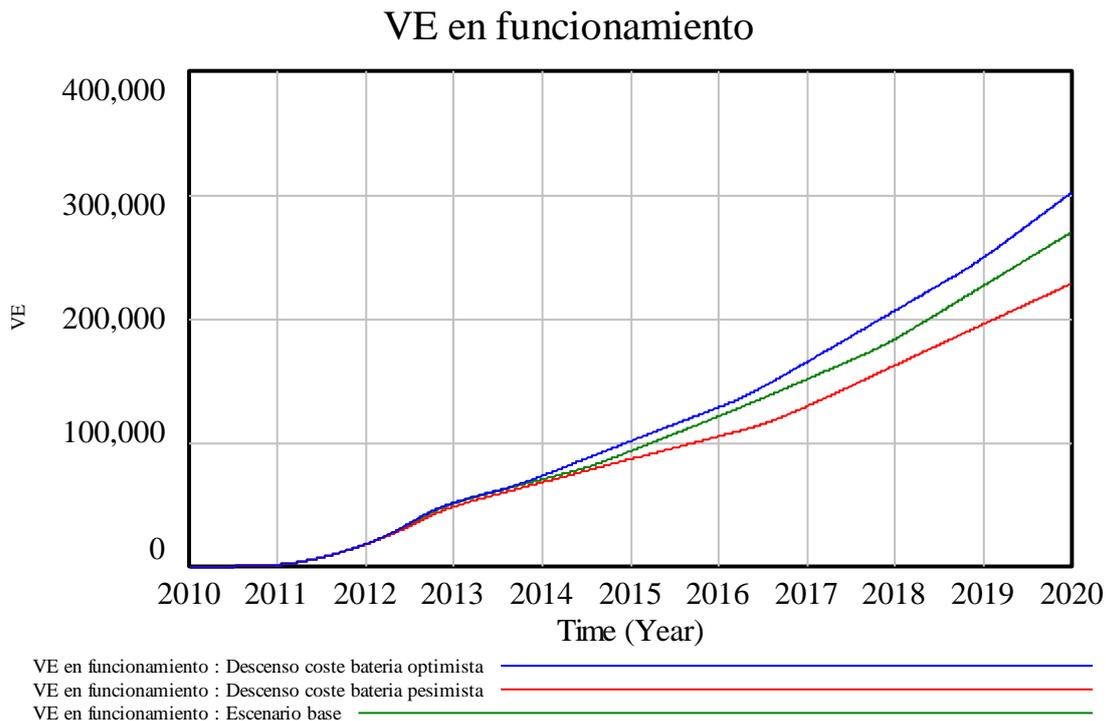
Para el análisis de esta evolución, se van a contemplar dos escenarios además del base: escenario optimista con un descenso anual de un 10% en el precio del kWh de la batería (corresponderá con una gran evolución de las ventas del vehículo eléctrico a

nivel mundial que haga bajar drásticamente el coste de la batería debido a su producción masiva), y uno pesimista, con un descenso anual de un 4% en el precio de la batería (escenario que representa un escaso éxito del vehículo eléctrico, donde la producción masiva de baterías no ha conseguido despegar de manera significativa para lograr una reducción importante en el precio de la misma). El escenario base es de un descenso del 7%. En la siguiente figura se puede observar el coste de la batería en los diversos escenarios.



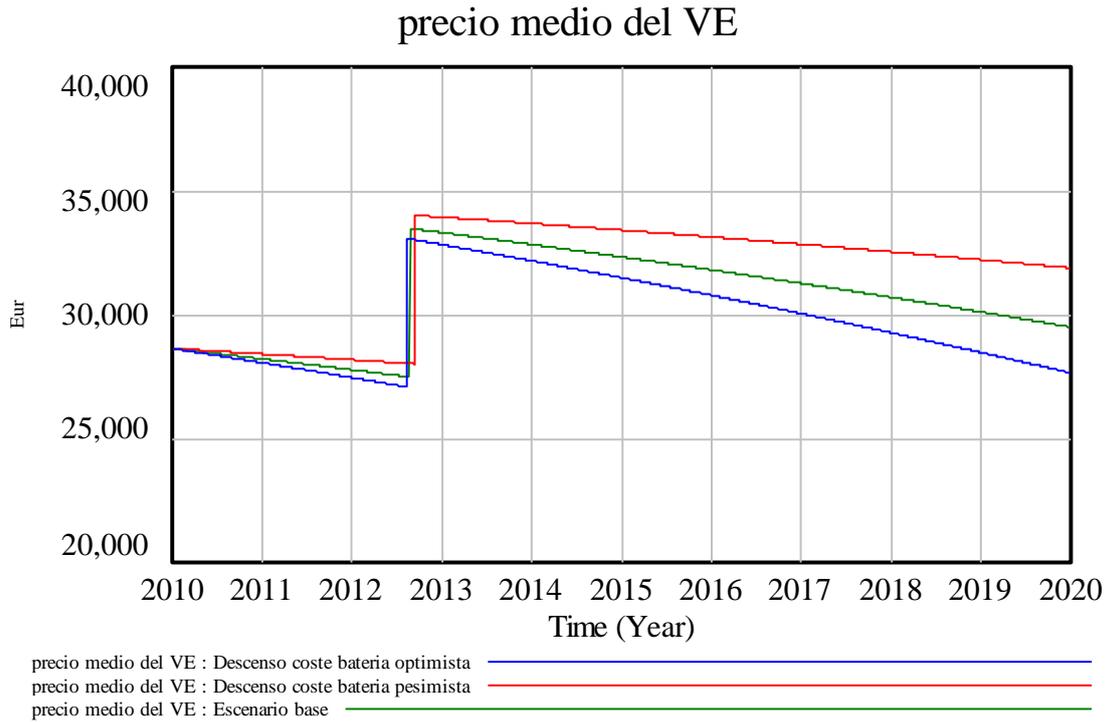
**Figura 191: Escenarios de descenso del coste de la batería.**

En estos tres casos, el parque de vehículos eléctricos evoluciona de la siguiente manera:



**Figura 192: Número de vehículos eléctricos en los escenarios de descenso del coste de la batería.**

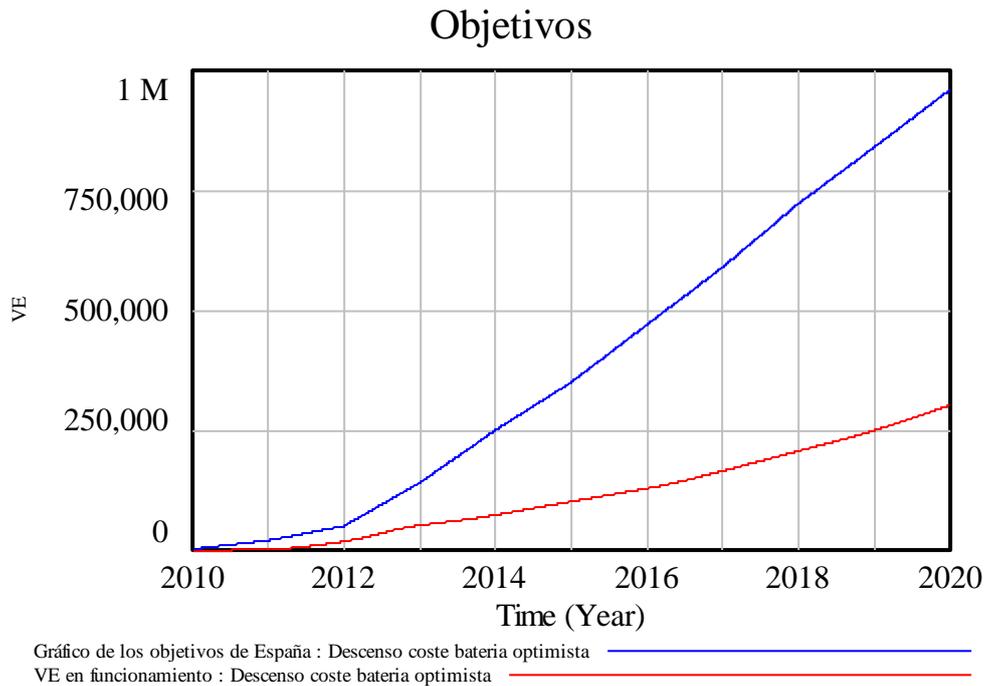
Se puede ver que hasta el año 2014 no existe una diferencia clara entre los diversos escenarios. Esto es debido a que la capacidad de la batería en estos primeros años de comercialización del vehículo eléctrico es relativamente pequeña (22 kWh). El valor del kWh entre los escenarios en el 2014 oscila entre valores de 328 y 424 €, es decir casi 96 € de diferencia, lo que multiplicado por 22 kWh son aproximadamente 2.100 €. A medida que la batería va aumentando en capacidad, esta diferencia de precios se hace más significativa. Esto se puede observar con claridad en la gráfica del precio medio del vehículo eléctrico con los valores actuales de subvención.



**Figura 193: Precio medio del vehículo eléctrico en los escenarios de descenso del coste de la batería.**

Si bien es cierto que en todos los escenarios se obtiene una reducción del precio, en el escenario pesimista, se podría decir que casi permanece constante, ya que se va a compensar la reducción del coste del kWh de la batería con el aumento de la capacidad de la misma.

Al igual que pasaba con el escenario de la mejora tecnológica de la capacidad de las baterías, si se frena el apoyo gubernamental en forma de subvención a la compra del vehículo eléctrico, las ventas se desploman. En la siguiente figura se puede observar el escenario optimista de reducción del coste de la batería con respecto a los objetivos del Gobierno.

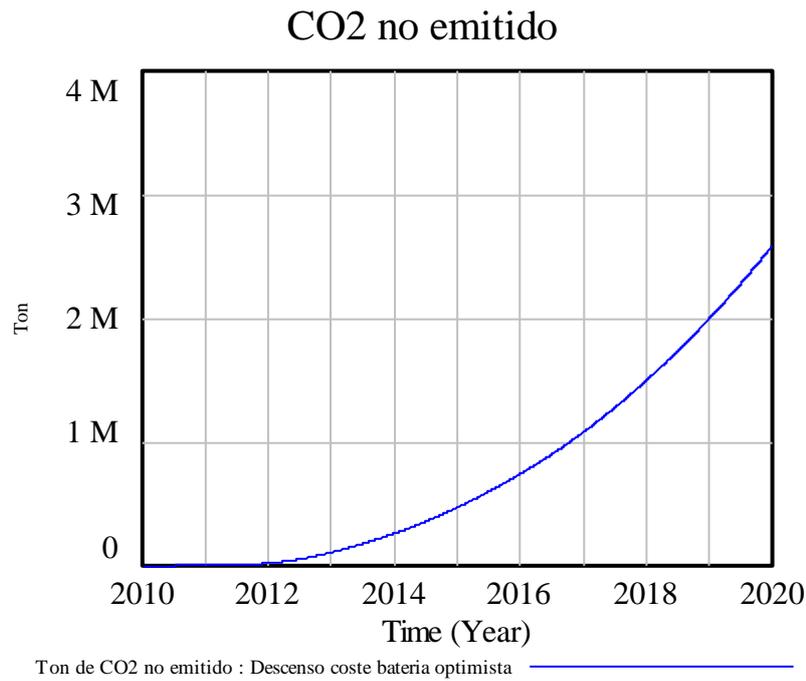


**Figura 194: Comparativa del número de vehículos eléctricos con los objetivos en el escenario de descenso del coste de la batería optimista.**

Aún con un descenso optimista del coste de la batería, los objetivos fijados quedan muy lejos de la realidad, por lo que es necesario ampliar la política de subvenciones.

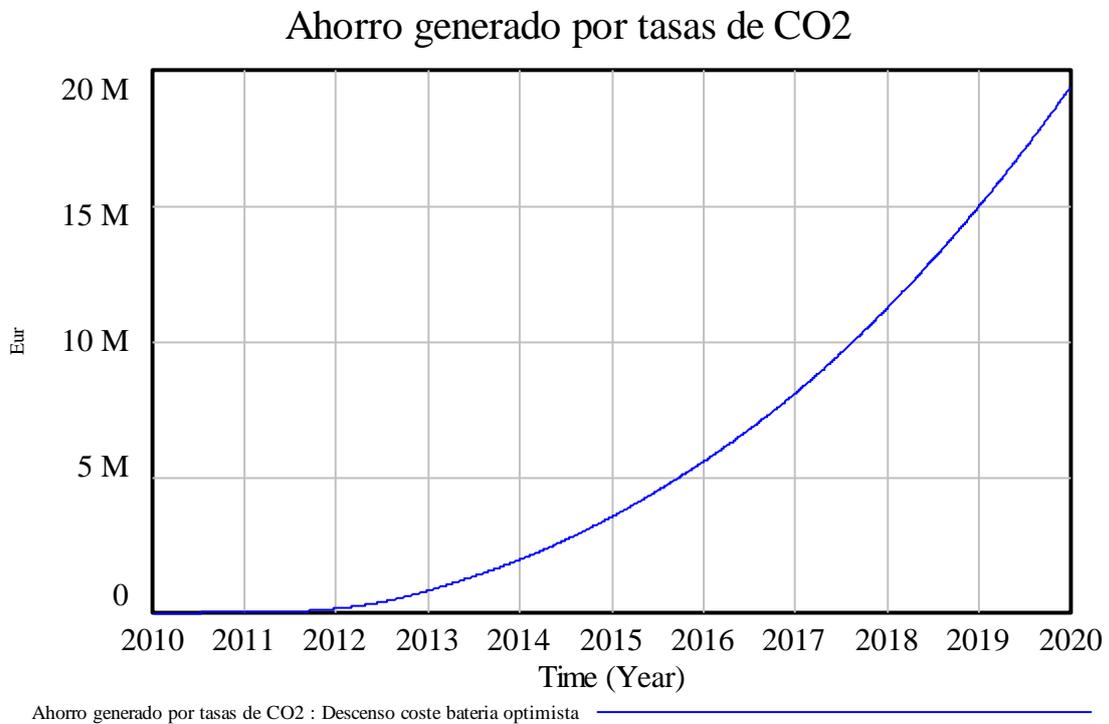
El gasto en subvenciones por parte del Gobierno será de aproximadamente 250 millones de euros que es el valor que se destinó de manera inicial. Una vez que se alcanza ese valor se frena el aporte de subvención a la compra.

En este caso, las emisiones de CO<sub>2</sub> no emitidas en el año 2020 serán algo más de 2 millones y medio como se ve a continuación.



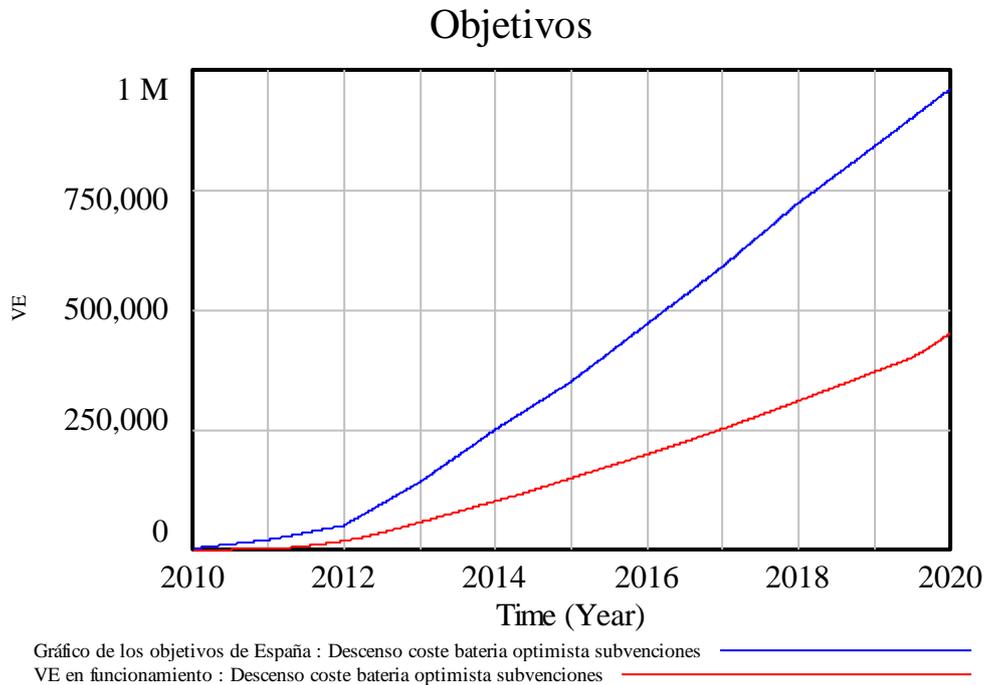
**Figura 195: Toneladas de CO<sub>2</sub> no emitidas en el escenario de descenso del coste de la batería optimista sin modificar las subvenciones.**

Valor que convertido a variable económica resulta cerca de 20 millones de euros.



**Figura 196: Ahorro económico por las emisiones de CO<sub>2</sub> no emitidas en el escenario de descenso del coste de la batería optimista sin modificar las subvenciones.**

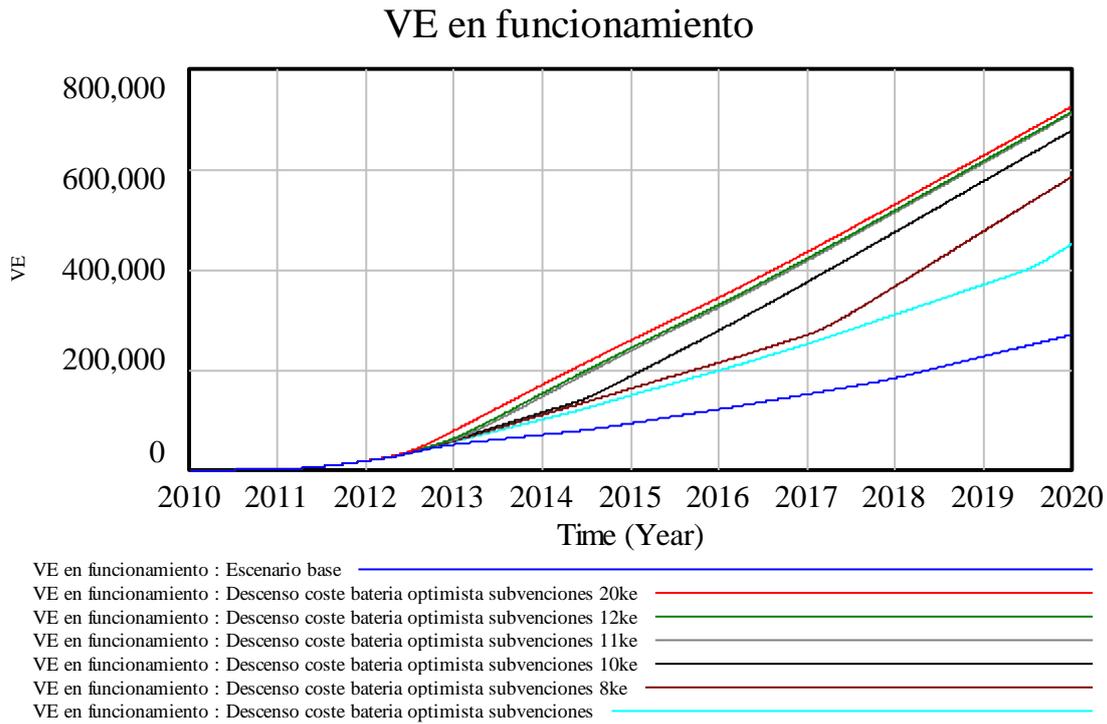
Al mantener constante la subvención de 6.000 € en el tiempo, se obtiene los siguientes resultados.



**Figura 197: Comparativa del número de vehículos eléctricos en el escenario de descenso del coste de la batería optimista con los objetivos del Gobierno, sin disminuir la subvención a la compra.**

Al igual que sucedía en los anteriores escenarios, ni en el escenario más optimista se consiguen los objetivos fijados por el Gobierno. De hecho no se está ni relativamente próximo.

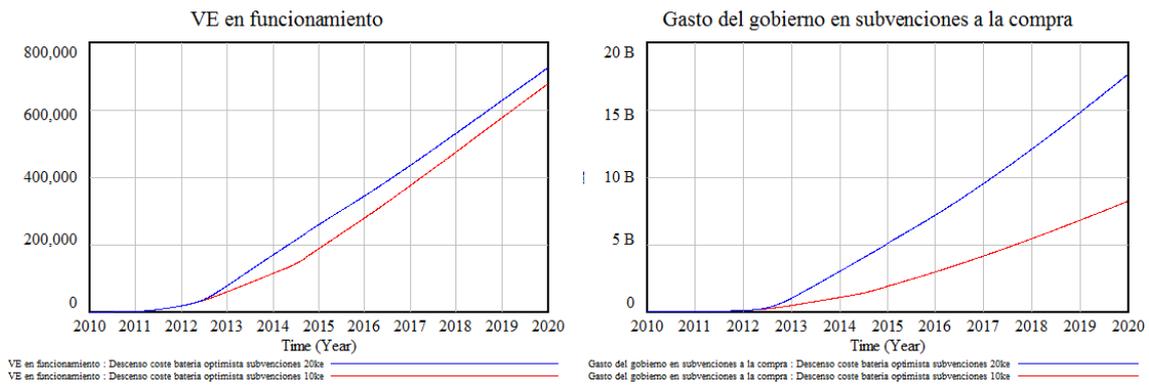
Al realizar el mismo ejercicio que se ha realizado con el escenario anterior para obtener un valor de subvención óptimo se obtienen los siguientes resultados:



**Figura 198: Comparativa del número de vehículos eléctricos en el escenario de descenso del coste de la batería optimista con los objetivos del Gobierno, con varios valores de subvención a la compra.**

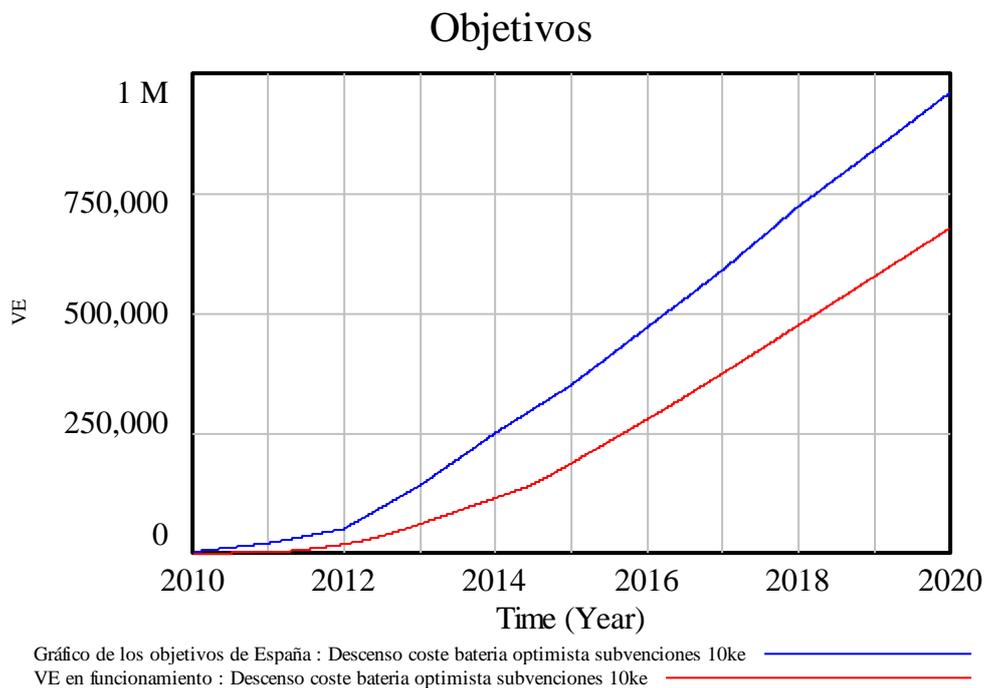
Al igual que ocurría en el escenario anterior, a partir de un cierto valor de subvención, no se obtiene un resultado de vehículos eléctricos en funcionamiento acorde a los esperado. En este caso, el valor de la subvención óptimo es de 10.000 € con el que se obtienen aproximadamente 677.000 vehículos eléctricos en 2020, que sigue estando lejos del valor fijado como objetivo por el Gobierno.

La elección de este valor de subvención se ha realizado en base a la optimización de los recursos económicos del Gobierno. Con una subvención de 10.000 euros se obtienen 677.000 vehículos eléctricos en 2020 con un gasto algo superior a los 8.000 millones de euros, mientras que en el caso extremo con una subvención de 20.000 euros se obtienen 725.000 vehículo eléctricos en 2020 con un gasto de más de 17.000 millones de euros. Claramente se observa que los aproximadamente 50.000 vehículos eléctricos a mayores que se obtienen con la subvención de 20.000 euros no compensan los 9.000 millones de euros a mayores que el Gobierno deben gastar.



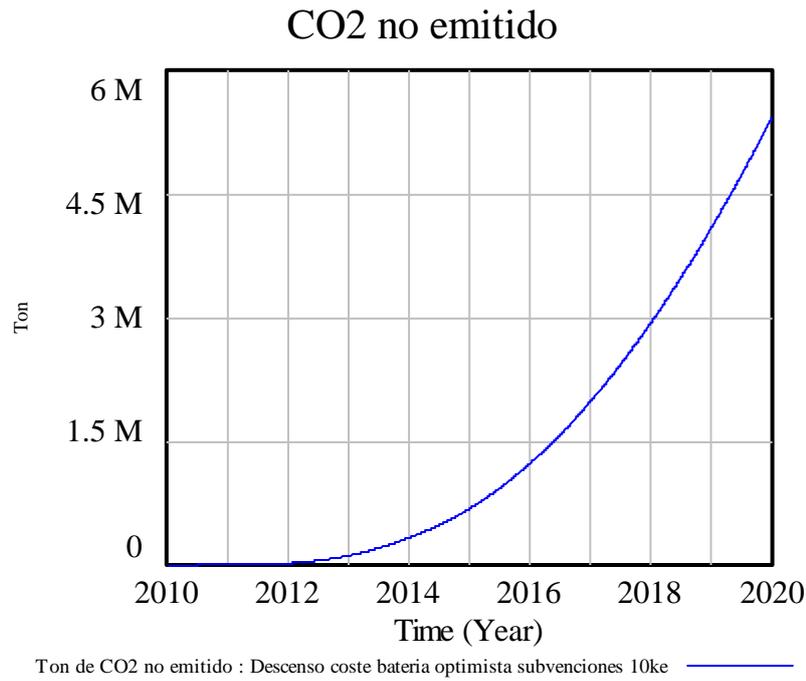
**Figura 199: Comparativa del número de vehículos eléctricos en el escenario de descenso del coste de la batería optimista con los objetivos del Gobierno con subvención a la compra de 20.000 € (azul) y 10.000 € (rojo).**

A continuación se muestra la comparativa de los vehículos eléctricos en el año 2020 en la hipótesis de subvención de 10.000 euros a la compra en comparativa con los objetivos fijados por el Gobierno.



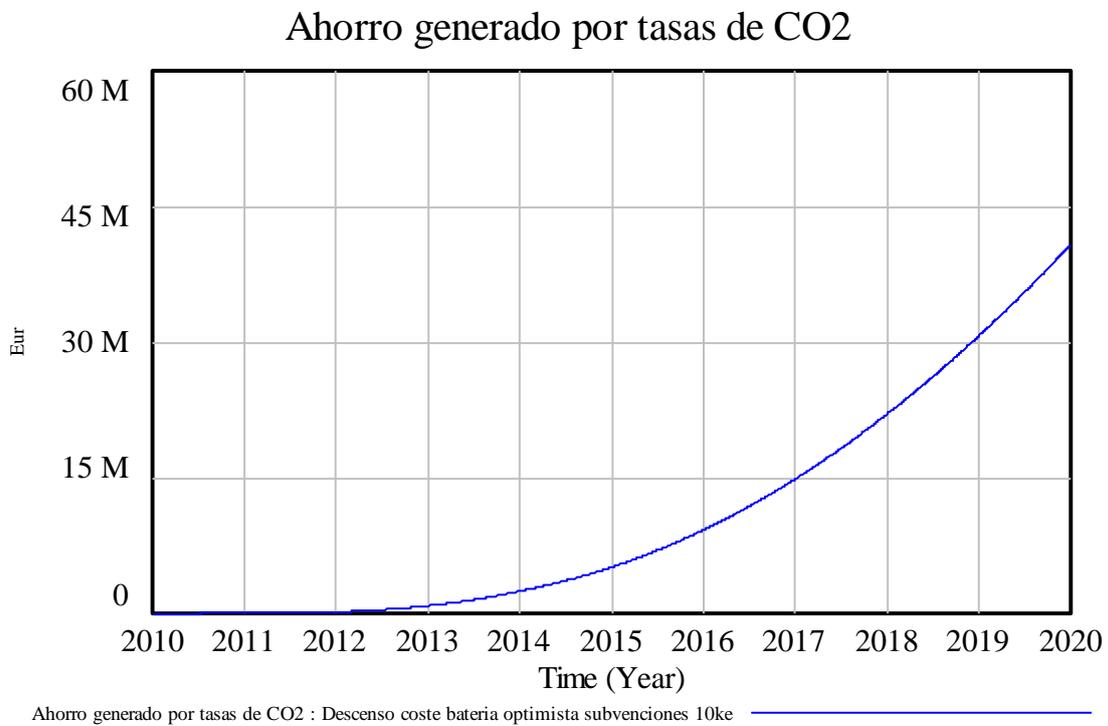
**Figura 200: Comparativa del número de vehículos eléctricos en el escenario de descenso del coste de la batería optimista con los objetivos del Gobierno con subvención a la compra de 10.000 €.**

Para estos datos, las emisiones de CO<sub>2</sub> no emitidas a la atmósfera en el año 2020 serán de cerca de 6 millones.



**Figura 201: Toneladas de CO<sub>2</sub> no emitidas en el escenario de descenso del coste de la batería optimista con subvención a la compra de 10.000 €.**

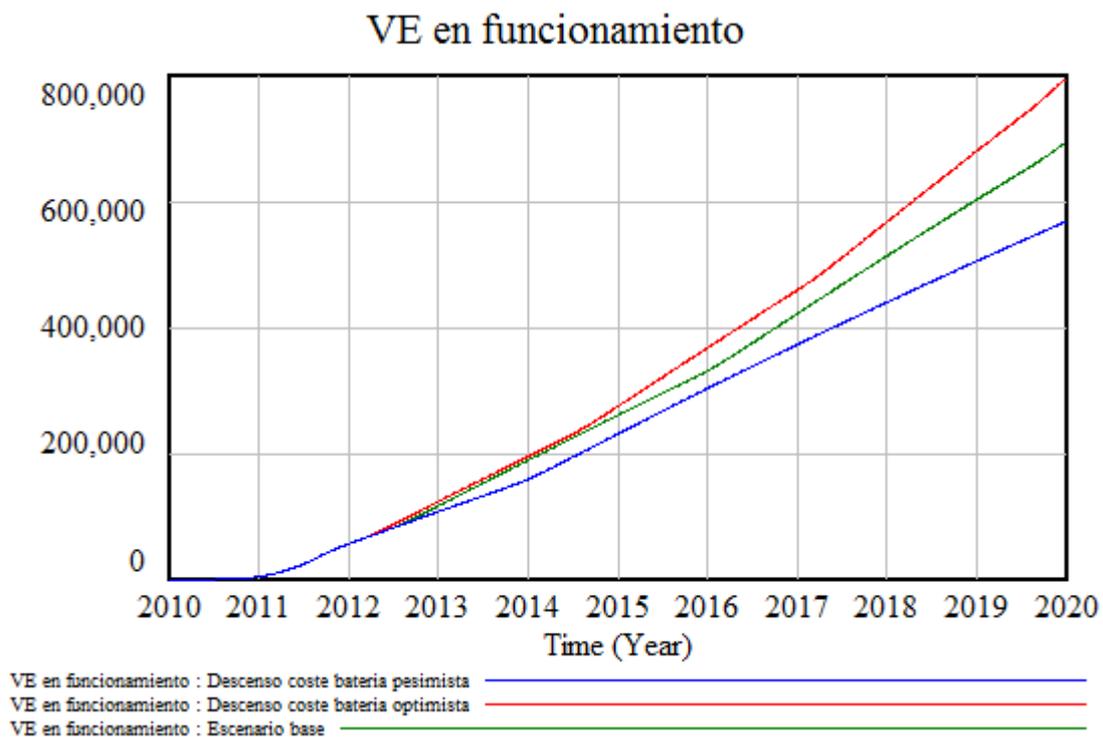
Con un ahorro económico de cerca de 40 millones de euros.



**Figura 202: Ahorro económico por las emisiones de CO<sub>2</sub> no emitidas en el escenario de descenso del coste de la batería optimista con subvención a la compra de 10.000 €.**

Al igual que se hizo en la simulación de los escenarios anteriores, al comparar estos resultados con los obtenidos con los del modelo del 2010, los valores obtenidos difieren enormemente.

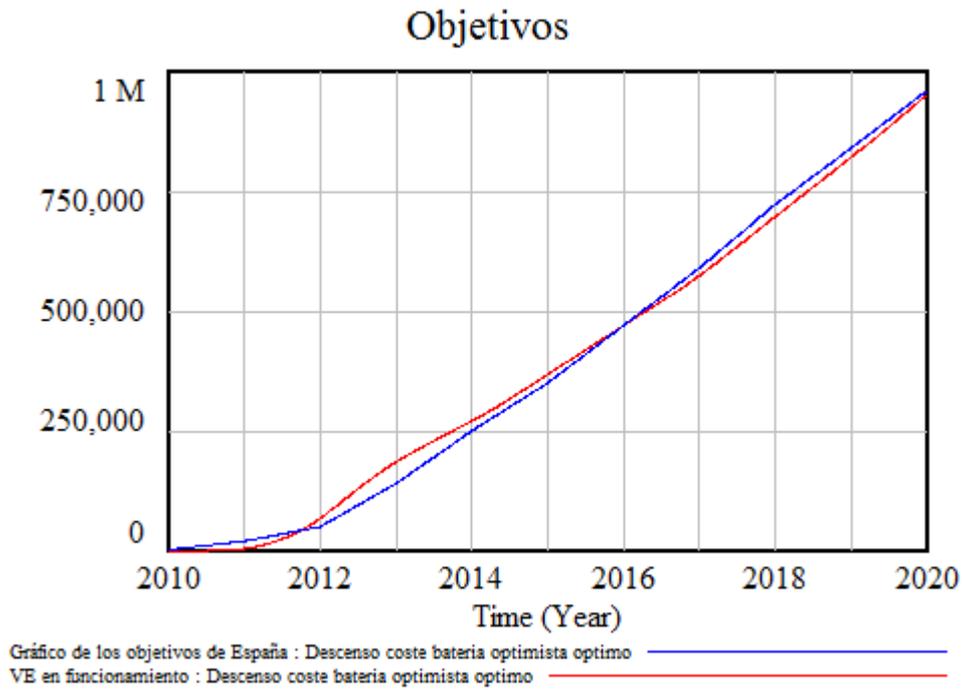
El dato principal de este escenario no variaba en el modelo del 2010 si bien el precio de adquisición del vehículo eléctrico sí. Con este dato y sin continuar con las subvenciones, los resultados que se obtenían eran los siguientes:



**Figura 203: Número de vehículos eléctricos en los escenarios de descenso del coste de la batería, sin disminuir la subvención a la compra con el modelo del 2010.**

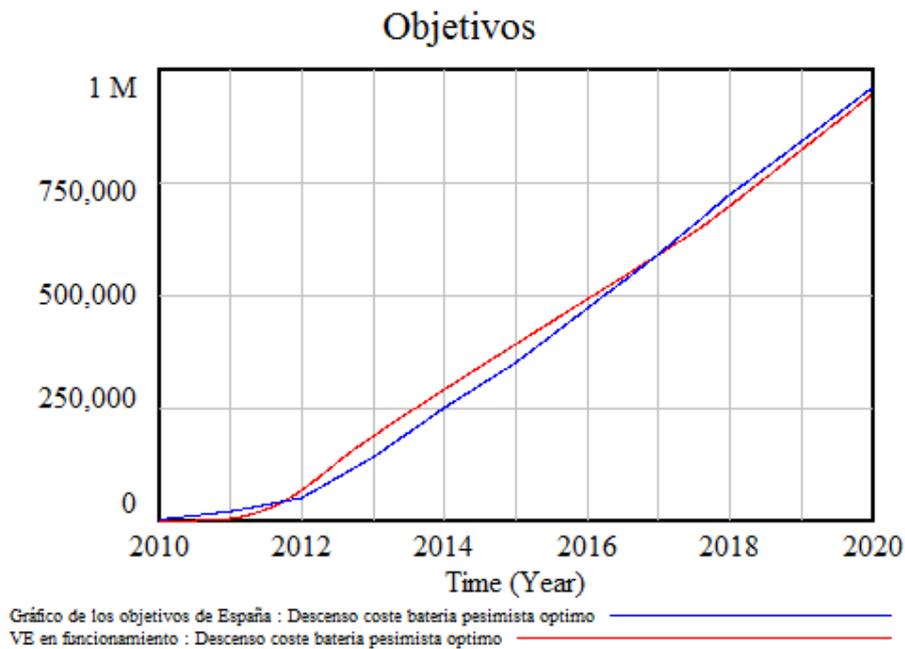
Obteniendo valores próximos a los 800.000 vehículos en el escenario más optimista. Este valor difiere enormemente con el del modelo del 2013 puesto que en el mejor de los escenarios se lograban valores cercanos a los 300.000 vehículos como se vio anteriormente en el caso de no mantener las subvenciones.

En caso de continuar con las subvenciones hasta el año 2020, en el modelo de 2010 se lograban los objetivos fijados por el Gobierno con un valor de subvención de únicamente 2.000 € en el caso más optimista como se muestra a continuación



**Figura 204:** Comparativa del número de vehículos eléctricos con los objetivos en el escenario de descenso del coste de la batería optimista con subvenciones adaptadas a los objetivos con el modelo del 2010.

Y de 5.000 € en el escenario más pesimista



**Figura 205:** Comparativa del número de vehículos eléctricos con los objetivos en el escenario de descenso del coste de la batería pesimista con subvenciones adaptadas a los objetivos con el modelo del 2010.

Al igual que sucedía en el escenario anterior, la diferencia principal de los modelos de 2013 y 2010 es el coste de adquisición del vehículo eléctrico, lo que repercute enormemente en el número de vehículos eléctricos que van a estar en funcionamiento en el año 2020 en España.

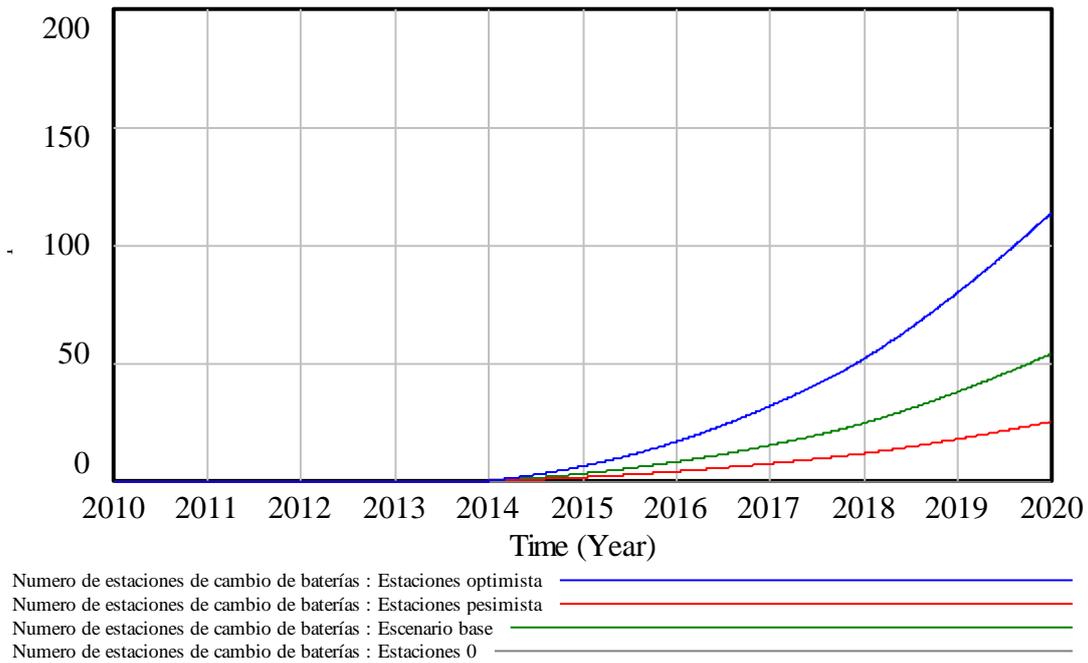
## **8.5 Escenarios de evolución de la implantación de estaciones de intercambio de baterías**

Como se ha mencionado con anterioridad, un punto determinante en el futuro desarrollo del vehículo eléctrico y su implantación en España, va a venir determinado por la infraestructura de recarga que vaya a existir. En este caso, se considera como punto clave, las estaciones de intercambio de baterías. Esto es debido a que se considera que la mayoría de los usuarios realizarán la recarga lenta en sus domicilios, por lo que los cargadores lentos públicos no serán extremadamente importantes, mientras que la recarga eléctrica tiene una serie de desventajas (acortar la vida de la batería, aumento significativo de la demanda eléctrica, etc.) que junto con el tiempo de carga de 20 minutos, no lo hacen muy atractivo.

Para el análisis de este parámetro, se ha tomado el escenario base explicado en el modelo, con la evolución previstas de estaciones de intercambio de baterías, un escenario pesimista que implique la mitad de estaciones, y un escenario optimista en el que se implanten el doble, pero en ningún caso antes del año 2014. Además de estos escenarios, también se ha contemplado un escenario en el que en ningún momento se lleguen a materializar las estaciones de intercambio de baterías en España.

En la siguiente figura se puede observar el número de estaciones de intercambio de baterías para cada uno de los escenarios.

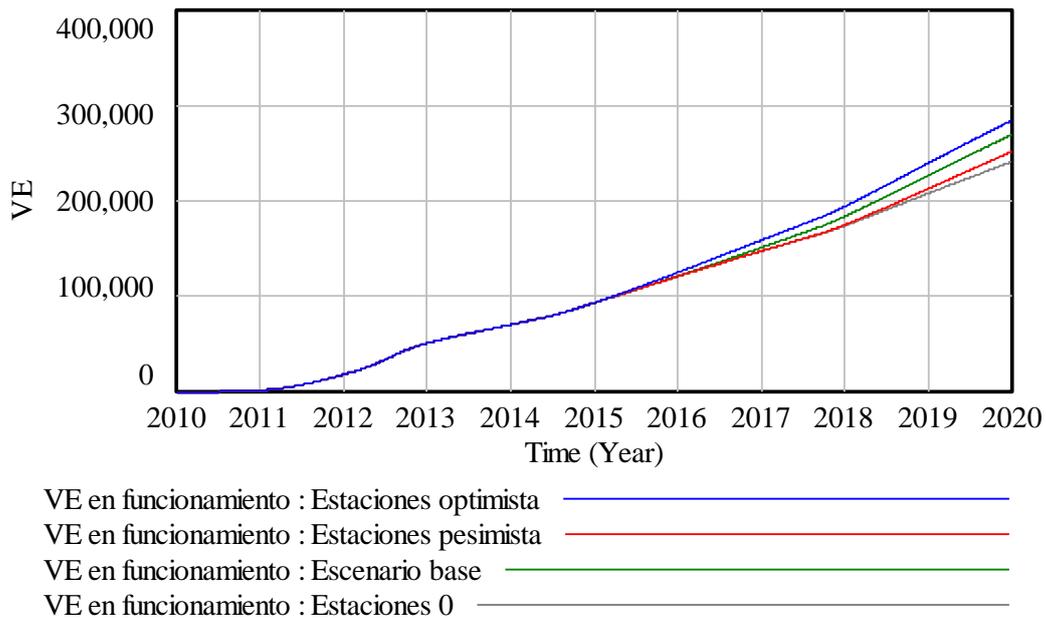
### Numero de estaciones de cambio de baterías



**Figura 206: Escenarios de número de estaciones de intercambio de baterías.**

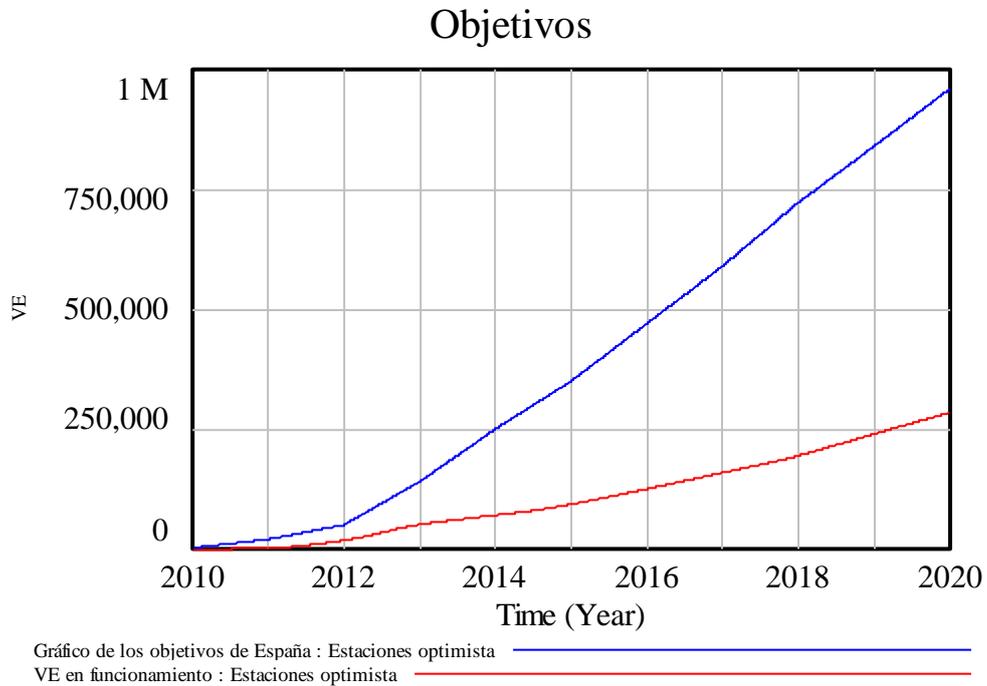
En estos diversos escenarios, se obtiene unos valores de vehículos eléctricos en funcionamiento en España que varían aproximadamente 30.000 vehículos de un escenario al otro en el 2020, con una diferencia de algo más de 50 estaciones de intercambio de baterías entre ambos escenarios:

### VE en funcionamiento



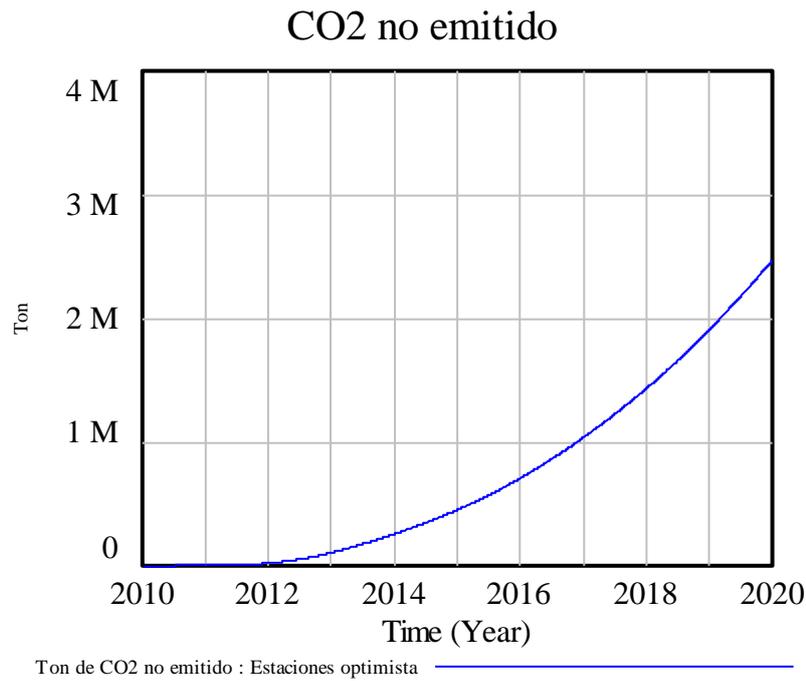
**Figura 207: Número de vehículos eléctricos en los escenarios número de estaciones de intercambio con la subvención actual.**

Al comparar los resultados del escenario optimista con los objetivos del Gobierno, se obtiene que siguen estando muy alejados, por lo que a habría que continuar con la política de subvenciones a la compra.



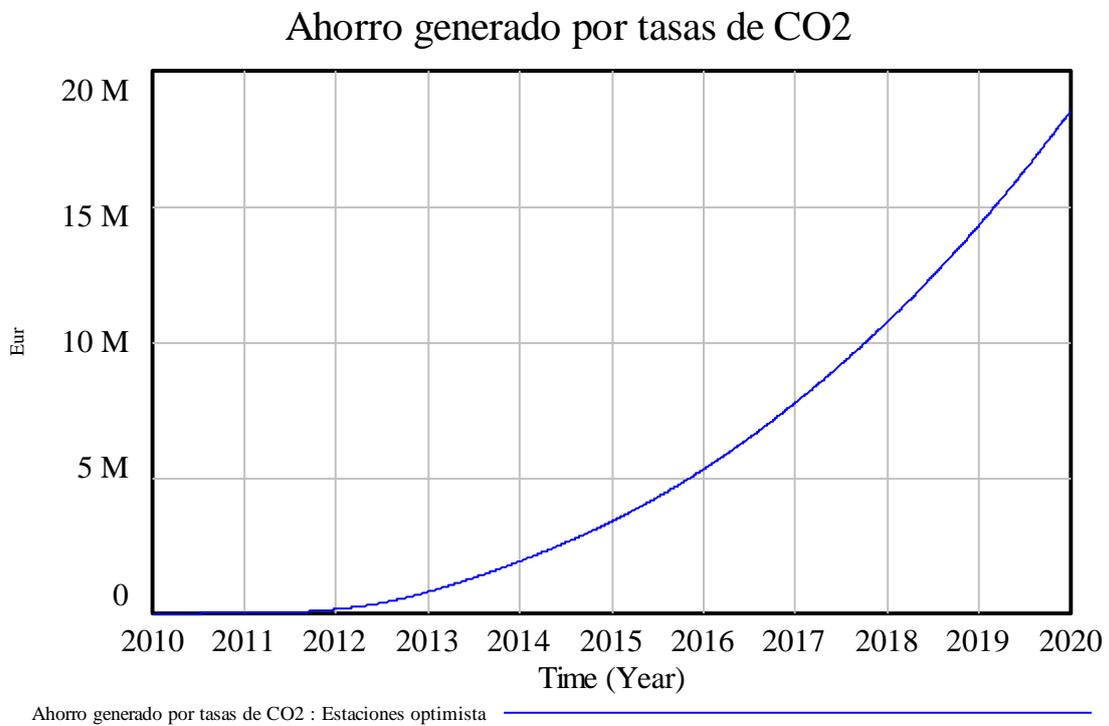
**Figura 208: Comparativa del número de vehículos eléctricos en el escenario número de estaciones optimista con los objetivos del Gobierno, con las subvenciones actuales.**

Las emisiones de CO<sub>2</sub> no emitidas serían las que se muestran a continuación



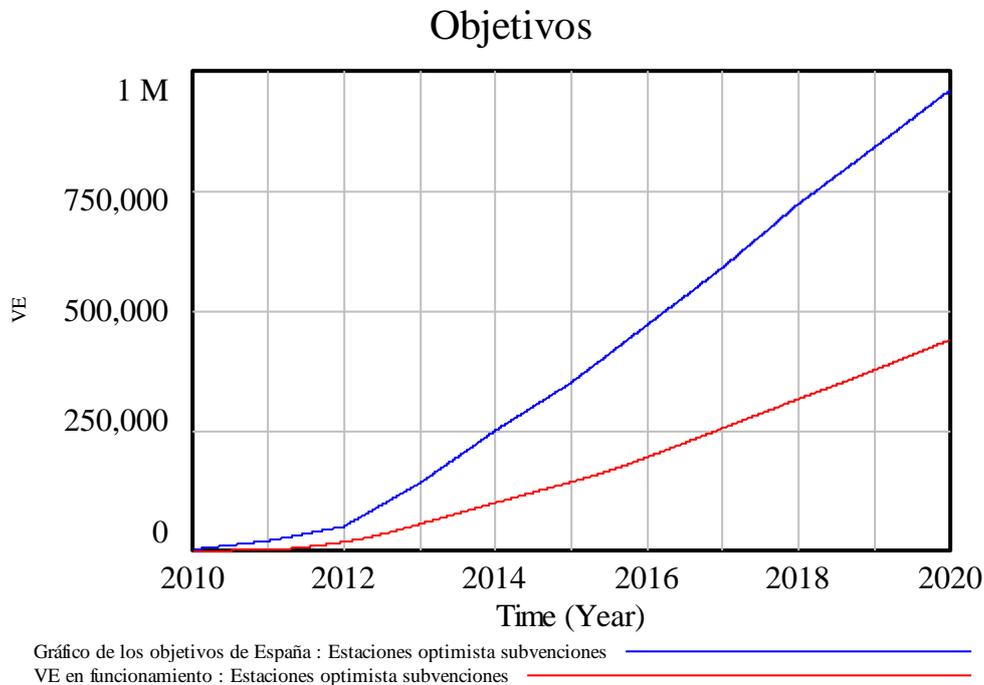
**Figura 209: Toneladas de CO<sub>2</sub> no emitidas en el escenario número de estaciones optimista con los objetivos del Gobierno, con las subvenciones actuales.**

Con un ahorro económico asociado de



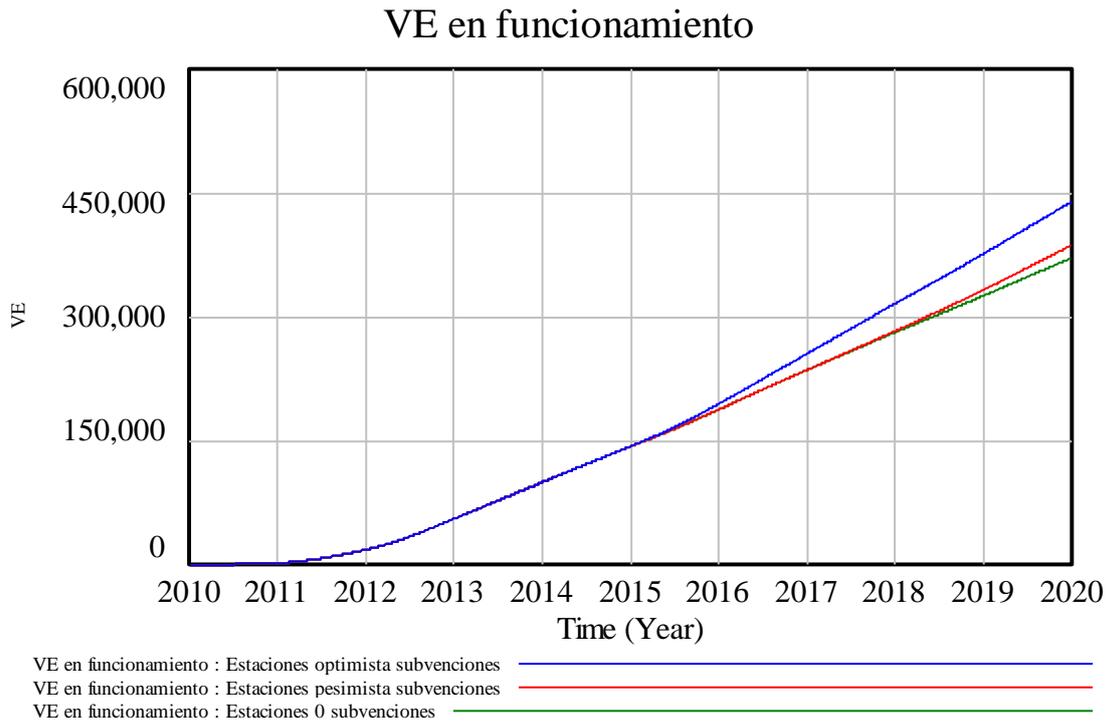
**Figura 210: Ahorro económico por las toneladas de CO<sub>2</sub> no emitidas en el escenario número de estaciones optimista con los objetivos del Gobierno, con las subvenciones actuales.**

Comenzando con el escenario optimista, en el caso de mantener constante la subvención de 6.000 € a partir de 2012 se obtienen unos resultados muy inferiores a los objetivos fijados.



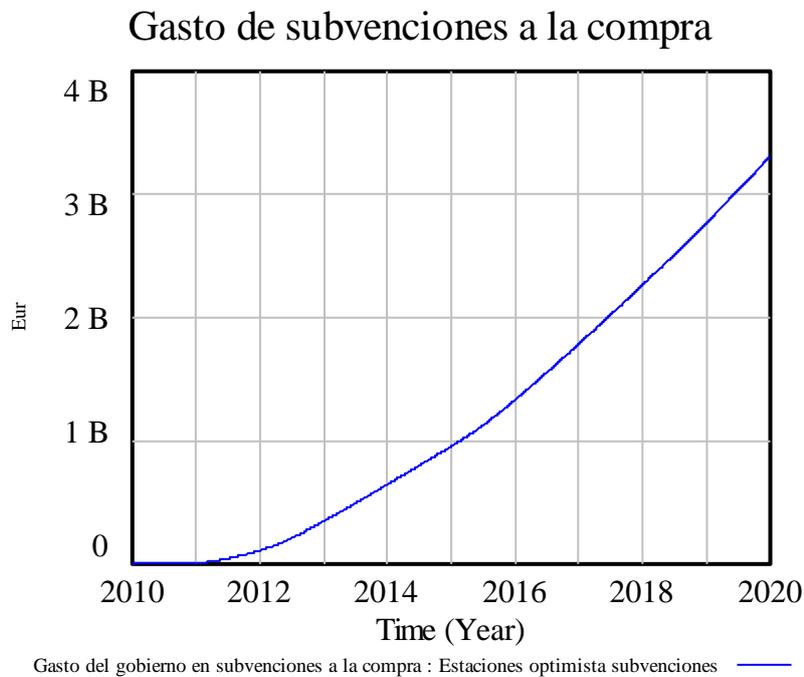
**Figura 211: Comparativa del número de vehículos eléctricos en el escenario de número de estaciones optimista con los objetivos del Gobierno, sin disminuir la subvención a la compra.**

Al mantener la subvención de 6.000 € a partir de 2012 tanto en el escenario optimista como en el pesimista en cuanto a implantación de estaciones de intercambio o incluso en el de implantación nula, se puede ver la diferencia de vehículos eléctricos debido a la falta de estaciones, es decir, se podrá analizar si es más rentable económicamente hablando subvencionar la compra o por el contrario incentivar la creación de este tipo de estaciones.



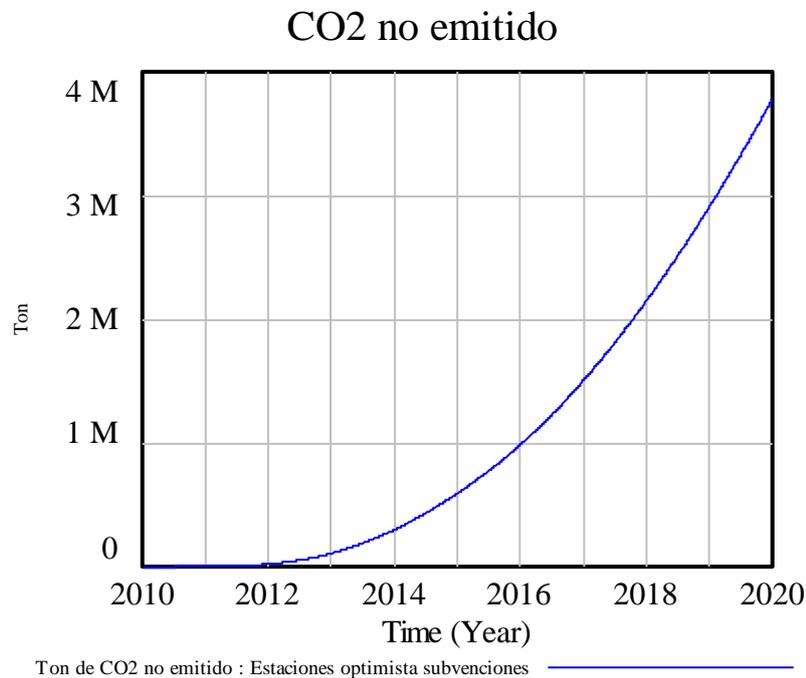
**Figura 212: Comparativa del número de vehículos eléctricos en el escenario de número de estaciones optimista y pesimista sin disminuir la subvención a la compra.**

El gasto del Gobierno en el caso optimista sería superior a los 3.000 millones de euros.



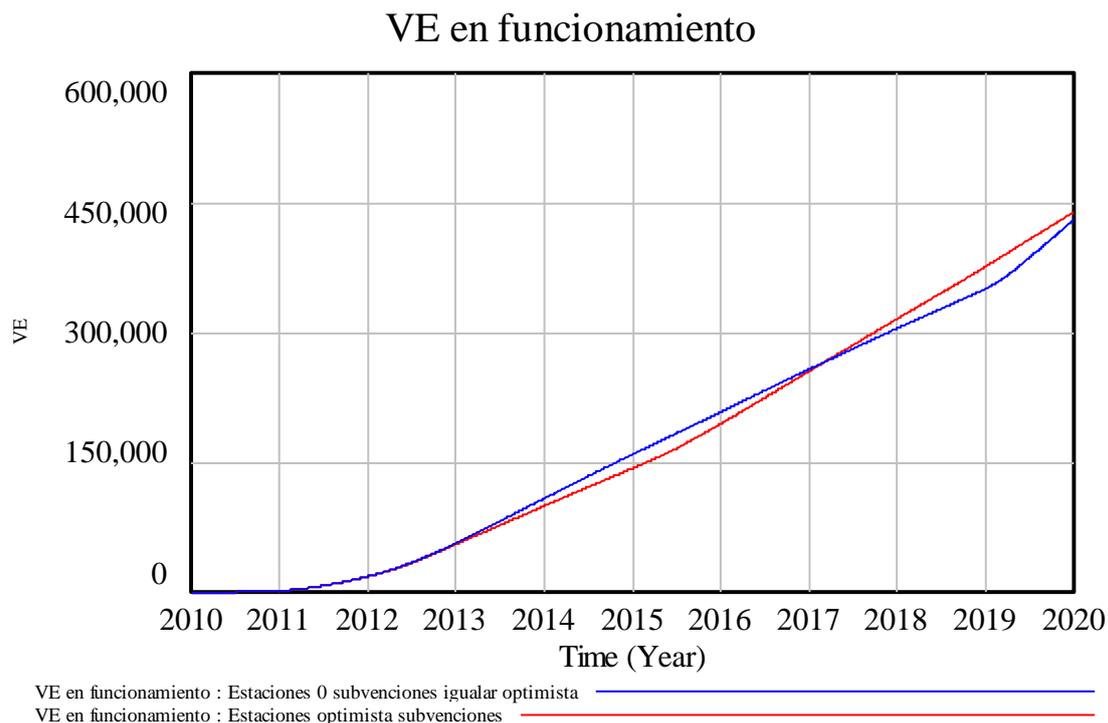
**Figura 213: Gasto del Gobierno en subvenciones en el escenario de número de estaciones optimista sin disminuir la subvención a la compra.**

En este caso se obtienen unas emisiones de CO<sub>2</sub> no emitidas a la atmósfera en el año 2020 cercanas a los 4 millones.



**Figura 214: Emisiones de CO<sub>2</sub> no emitidas en el escenario de número de estaciones optimista sin disminuir la subvención a la compra.**

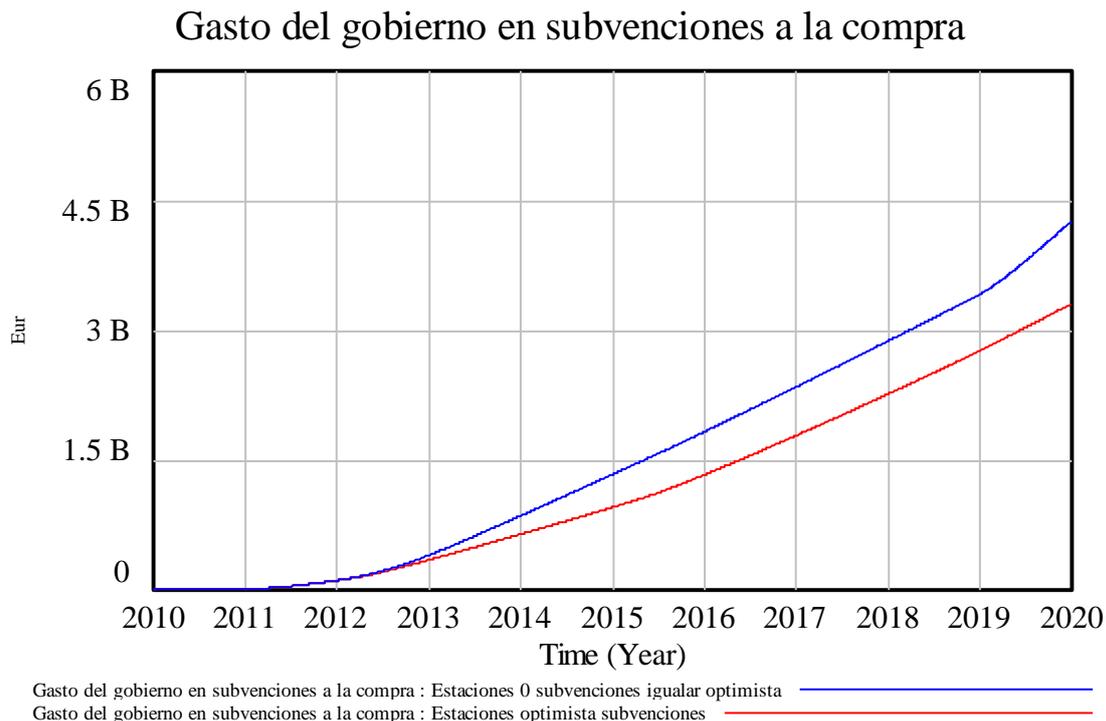
Una vez obtenido este dato, es necesario calcular cual sería la subvención en el escenario de implantación nula de estaciones de intercambio para poder alcanzar los mismos valores de vehículos eléctricos en 2020. Dicho valor se ha fijado en 8.000 € frente a los 6.000 € iniciales utilizados.



**Figura 215: Comparativa del número de vehículos eléctricos en el escenario de número de estaciones optimista sin disminuir la subvención a la compra y en el pesimista con una subvención de 8.000 €.**

Los resultados en el 2020 son muy similares si en el escenario optimista se mantienen las subvenciones de 6.000 € y en el de implantación nula de estaciones de intercambio se aumentan hasta los 8.000 €.

En la siguiente gráfica se puede comparar el gasto que el Gobierno tiene que realizar para subvencionar la adquisición de vehículos eléctricos

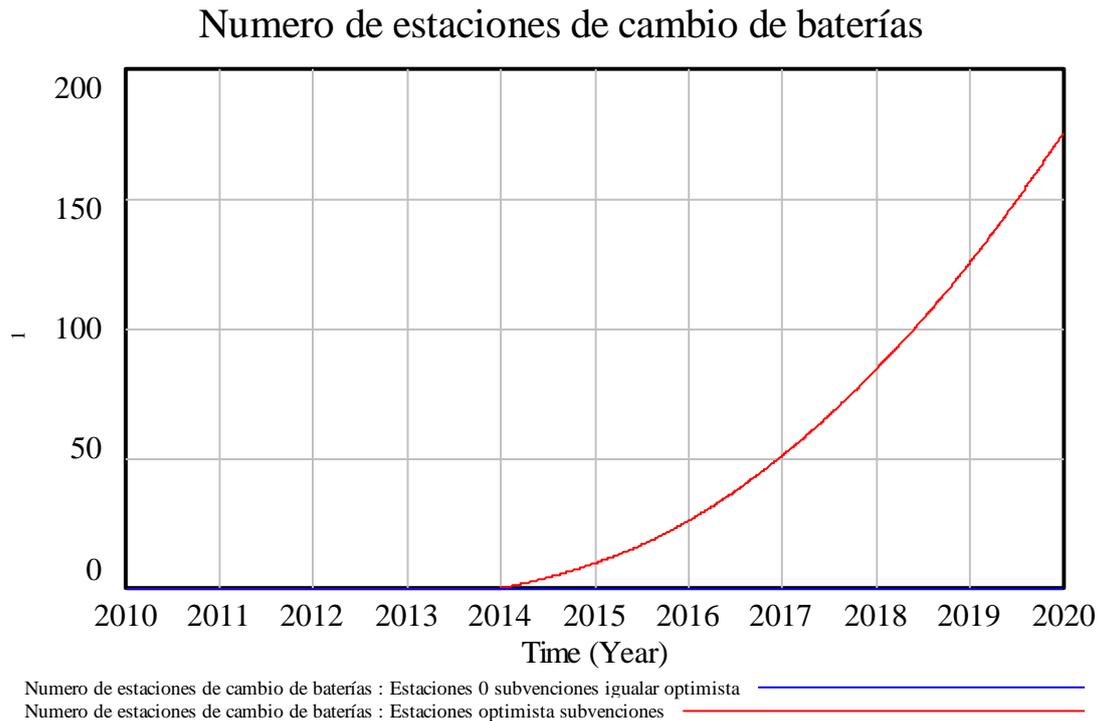


**Figura 216: Gasto del Gobierno en subvenciones en el escenario de número de estaciones optimista con una subvención a la compra de 6.000 € y en el de nula implantación con una subvención de 8.000 €.**

Para lograr un número de vehículos en funcionamiento similares en el año 2020, en el escenario optimista, es necesario desembolsar algo más de 3.300 millones de euros, mientras que en el de implantación nula son necesarios más de 4.200 millones de euros, es decir, existe una diferencia entre ambos de aproximadamente 900 millones de euros.

Teniendo en cuenta que la implantación de una estación de intercambio de baterías tiene un coste de 500.000 \$ [Shukla11], [Kaschub12], es decir, aproximadamente 400.000 €, se puede calcular fácilmente la conveniencia o no de implantar más estaciones de intercambio de baterías.

Comparando el número de estaciones entre ambos escenarios se obtiene que existe una diferencia de aproximadamente 175 estaciones.



**Figura 217: Número de estaciones en el escenario de número de estaciones optimista con una subvención de 6.000 € a la compra, y el escenario de nula implantación.**

Si en el escenario de nula implantación se construyen 175 estaciones, es decir, se equipara con el escenario optimista, el resultado de vehículos eléctricos en funcionamiento será el mismo, pero con unas subvenciones muy inferiores (2.000 € menos por vehículo), con un coste de 70 millones de euros en inversión para la creación de las estaciones.

Es decir, la realización de una inversión de 70 millones de euros en infraestructura de intercambio de baterías en el escenario de implantación nula, implica un ahorro de 900 millones en subvenciones a la compra, por lo que se obtiene un balance positivo de 830 millones de euros. Esta inversión no es de ninguna manera muy elevada, teniendo en cuenta que la inversión realizada por *Dong Energy*, la principal eléctrica danesa, en infraestructura para la recarga eléctrica entre 2009 y 2011 es de 103 millones de euros [Better]. Además, este gasto de 70 millones, no tiene por qué acometerlo el Gobierno, sino que puede venir de sociedades privadas, puesto que la estación de intercambio de baterías es una fuente de ingresos económicos.

Este tipo de estaciones también son beneficiosas para la eficiencia del sistema eléctrico, puesto que realizan recargas lentas, que por la noche ayudarán a aplanar la curva de la demanda, mientras que por el día no elevarán demasiado la demanda.

A la vista de estos resultados, la conclusión que se puede obtener en estos escenarios es muy clara: es mucho más rentable emplear el dinero en la construcción de estaciones de intercambio de baterías que en la entrega de subvenciones al cliente en la compra del vehículo eléctrico para la obtención de similares resultados.

Si bien es cierto que llegará un momento en el que por muchas estaciones de intercambio de baterías que se introduzcan el sistema no va a cambiar puesto que se puede definir que ya existen las suficientes como para satisfacer la necesidad. Es decir, si en una ciudad de tamaño mediano existe 100 vehículos eléctricos y existen por ejemplo 5 estaciones de intercambio, por mucho que se añadan más estaciones no va a variar el atractivo puesto que el valor existente de estaciones es más que suficiente para la ciudad.

## **8.6 Escenarios de evolución del número de puntos de carga**

Al igual que se han estudiado escenarios ligados a las estaciones de intercambio de baterías, se ha considerado también interesante entender la evolución del mercado de los vehículos eléctricos en función de los puntos de carga existentes. Como dato de partida se ha tomado la curva previsional realizada por el Gobierno hasta el 2014 y extrapolada hasta 2020.

Para poder realizar la comparativa se ha trabajado con otros dos escenarios, uno pesimista respecto a esta previsión y otro optimista. Las curvas con las que se van a trabajar son las siguientes:

## Evolución del número de puntos de recarga

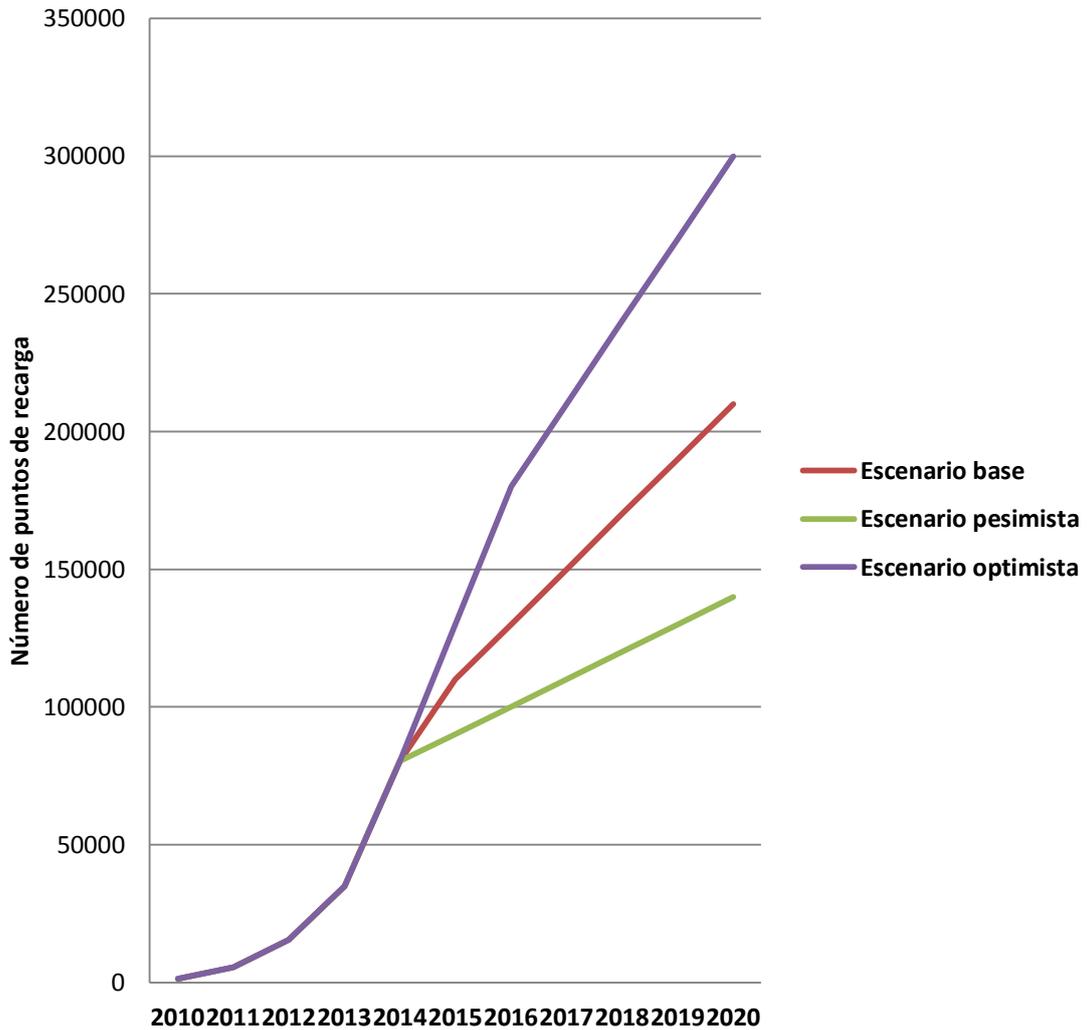
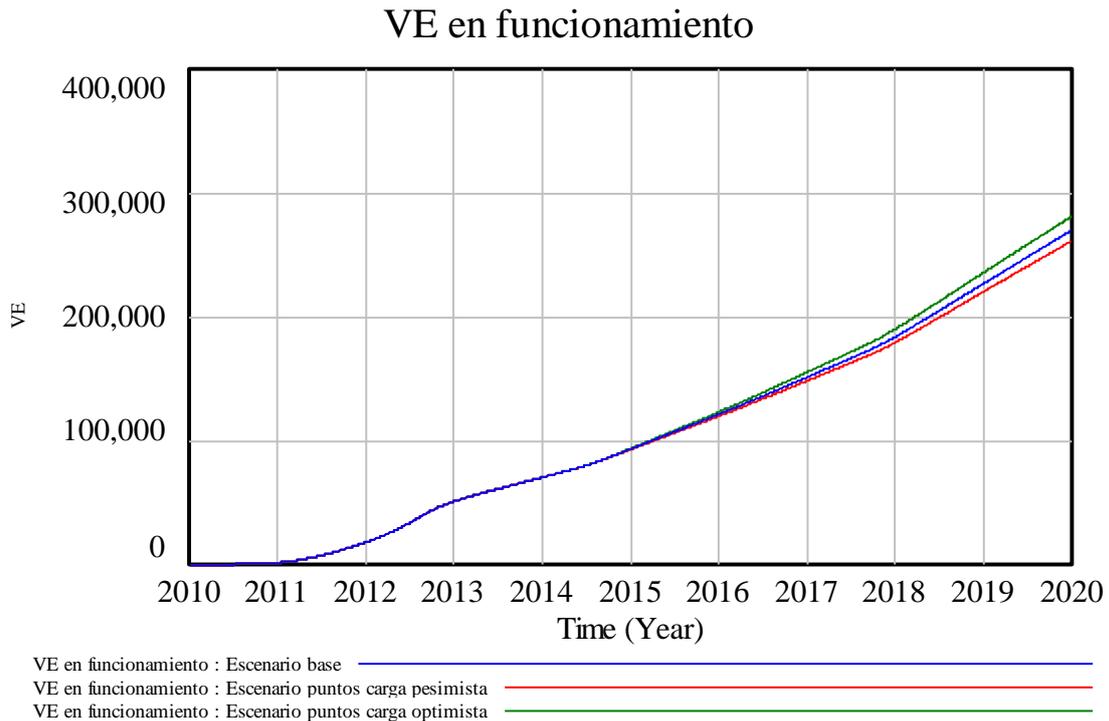


Figura 218: Evolución del número de puntos de recarga en función de los escenarios.

Al simular el modelo con estos tres escenarios los resultados que se obtienen en cuanto al número de vehículos eléctricos en funcionamiento sin modificar las subvenciones son los siguientes:



**Figura 219: Número de vehículos eléctricos en los tres escenarios de puntos recarga.**

Como se puede ver, no se observan unas grandes diferencias entre los tres escenarios en cuanto a resultados se refiere. De hecho solamente existe una diferencia de 20.000 vehículos eléctricos entre el escenario optimista y el pesimista, que sí difieren enormemente en cuanto al número de puntos de recarga (más del doble). El motivo de esto es debido a que en estos años iniciales de implementación del vehículo eléctrico en España, tal y como se explicó en el bloque del atractivo, los consumidores van a ser los innovadores que no van a estar tan influenciados por agentes externos. También es previsible que la gran mayoría de estos primeros consumidores posean un garaje propio que hayan acondicionado para prescindir de estos cargadores externos.

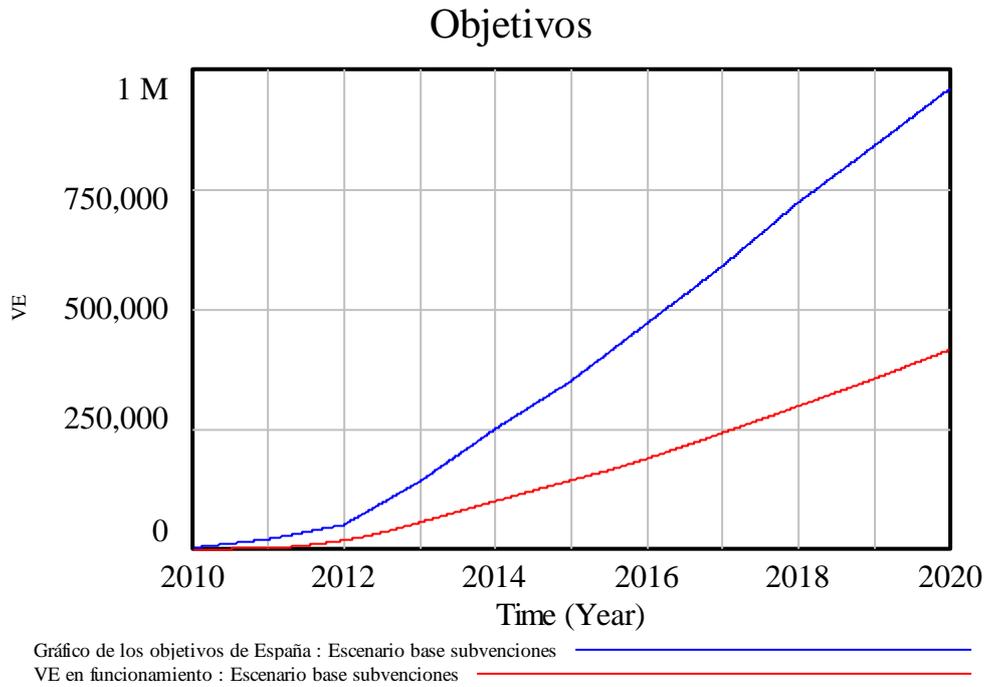
Por todos estos factores y a la vista de los resultados se considera que el modelo es poco sensible al número de puntos de recarga y no se incluirá en las evoluciones de los demás escenarios a tratar posteriormente.

## 8.7 Escenarios de evolución de las subvenciones

El siguiente escenario a analizar corresponde con el escenario base, en el cual se van a modificar los valores de las subvenciones para intentar alcanzar un valor acorde a los objetivos gubernamentales para los próximos años.

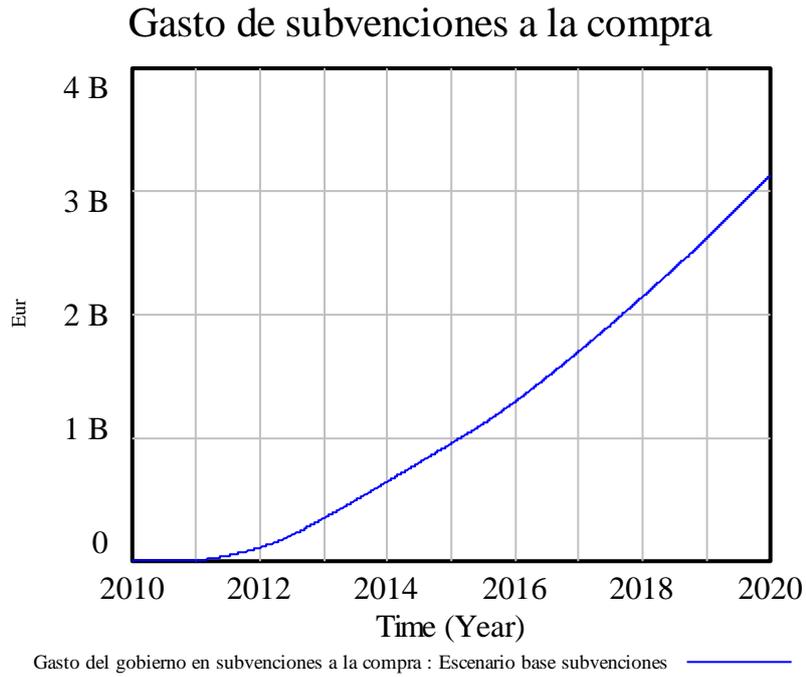
La primer hipótesis al igual que se ha hecho en los escenarios anteriormente analizados es la de suponer que se continúe con la subvención de 6.000 € en la adquisición del vehículo eléctrico a partir de 2012.

En este caso el resultado será:



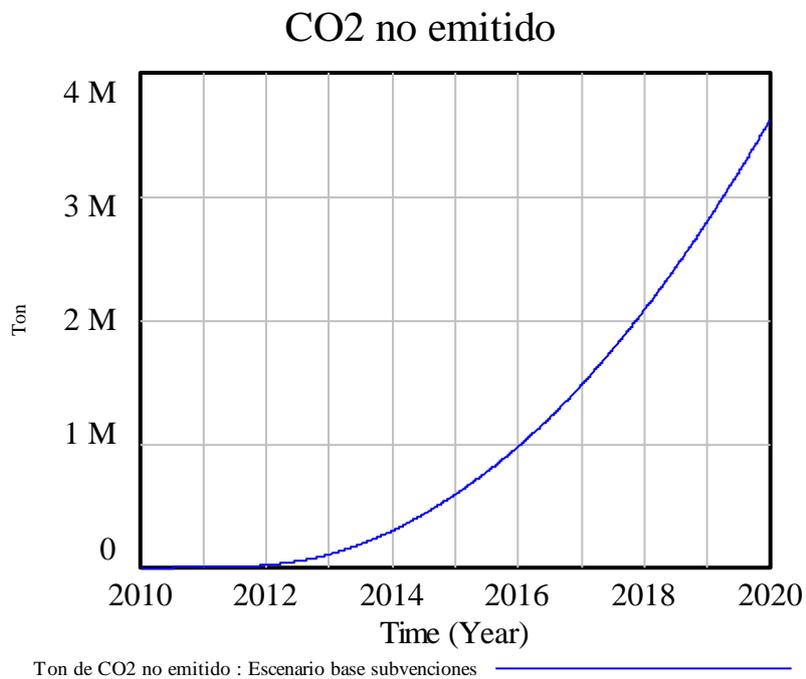
**Figura 220: Número de vehículos eléctricos en el escenario base sin disminuir la subvención a la compra.**

con unos gastos en subvenciones por parte del Gobierno superiores a los 3.000 millones de euros.



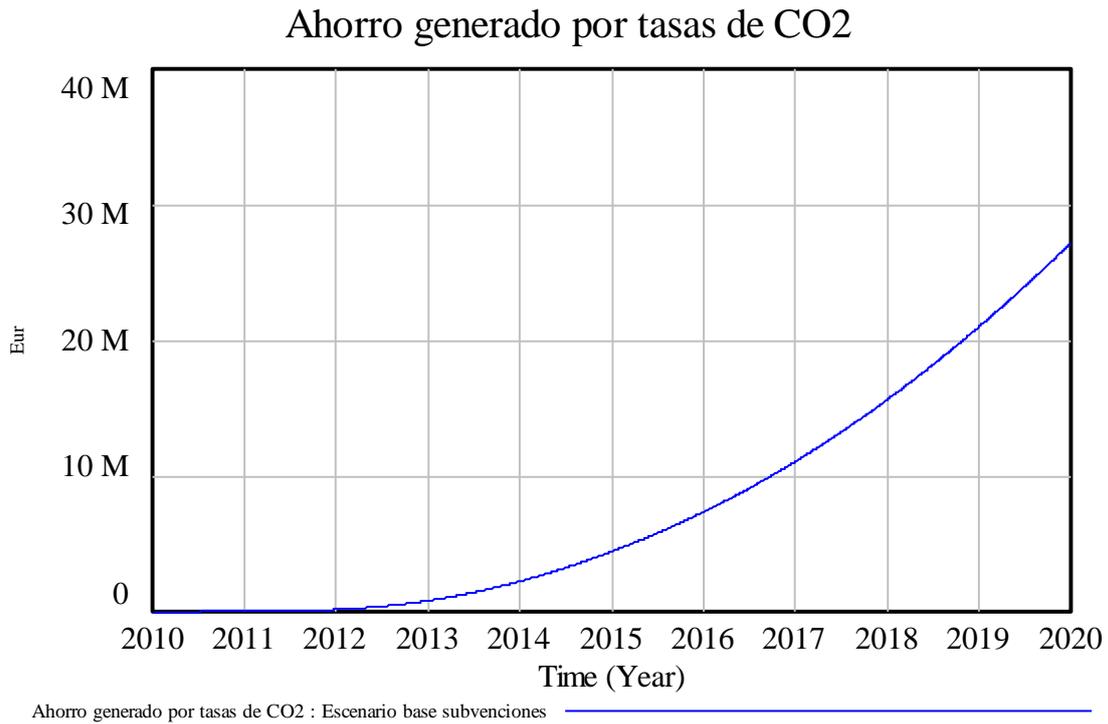
**Figura 221: Gasto del Gobierno en subvenciones a la compra, sin disminuir la subvención actual.**

Y algo menos de 4 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> no emitidas en el 2020.



**Figura 222: Emisiones de CO<sub>2</sub> no emitidas en el escenario base sin disminuir la subvención actual.**

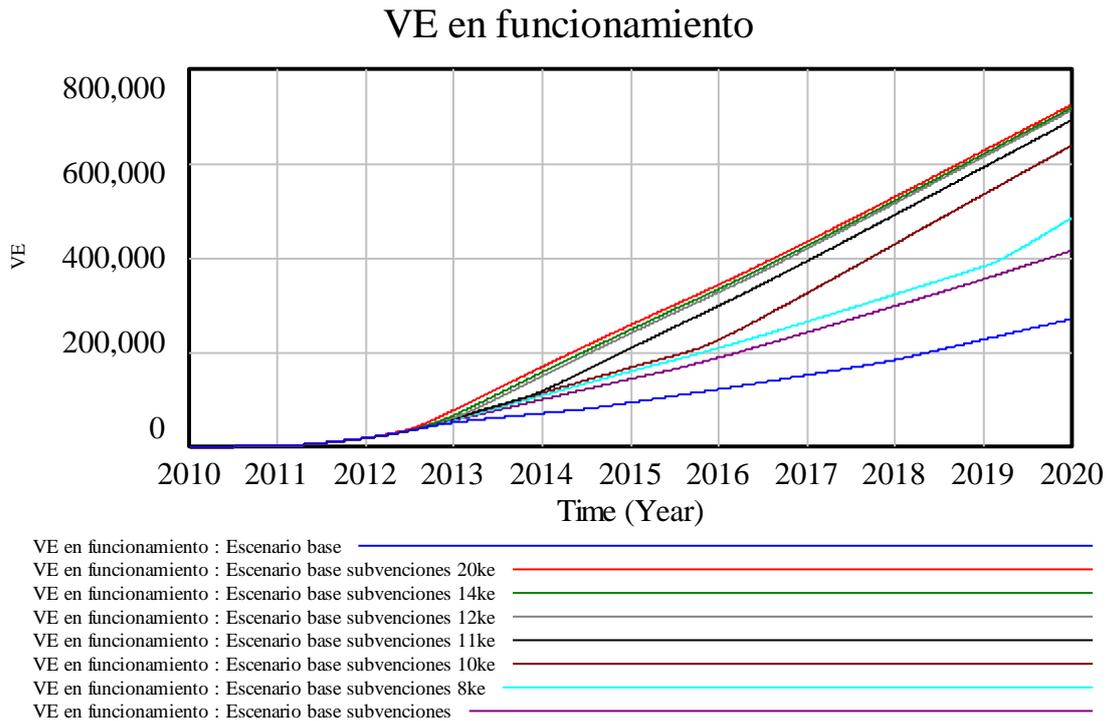
Con un ahorro económico asociado de



**Figura 223: Ahorro económico por las emisiones de CO<sub>2</sub> no emitidas en el escenario base sin disminuir la subvención actual.**

Aun manteniendo las subvenciones, a la vista de estos resultados, se ve claramente que no se logran los objetivos fijados para el año 2020.

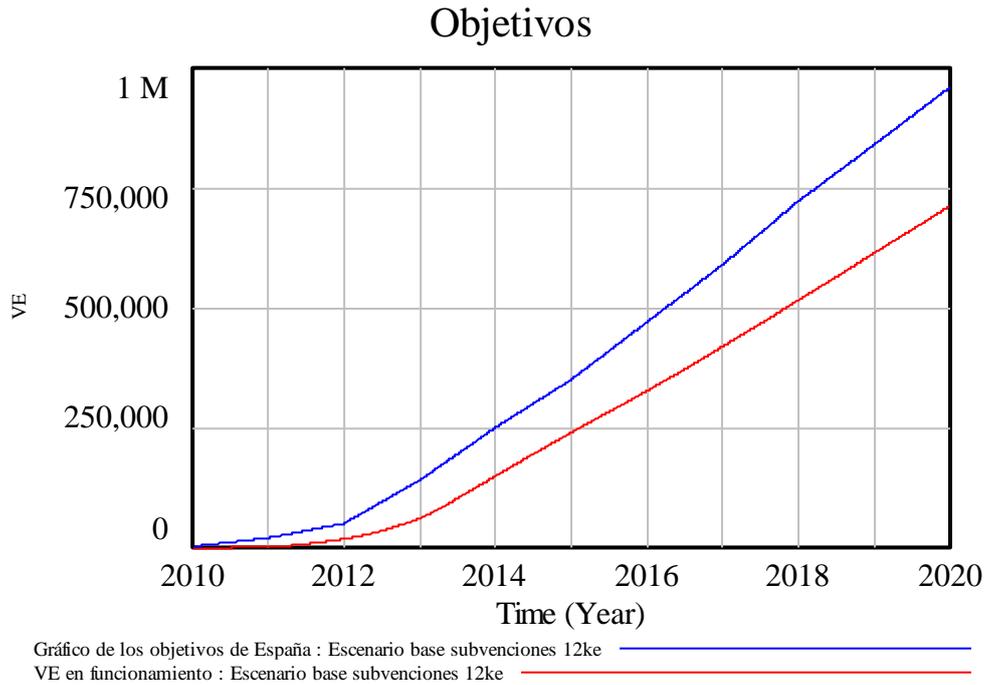
En la siguiente figura se puede el escenario base al que se le van añadiendo diferentes valores de subvenciones desde los 6.000 € iniciales hasta los 14.000 € asumiendo que no existirá límite de presupuesto.



**Figura 224: Rango de vehículos eléctricos dependiendo del valor de la subvención en el escenario base.**

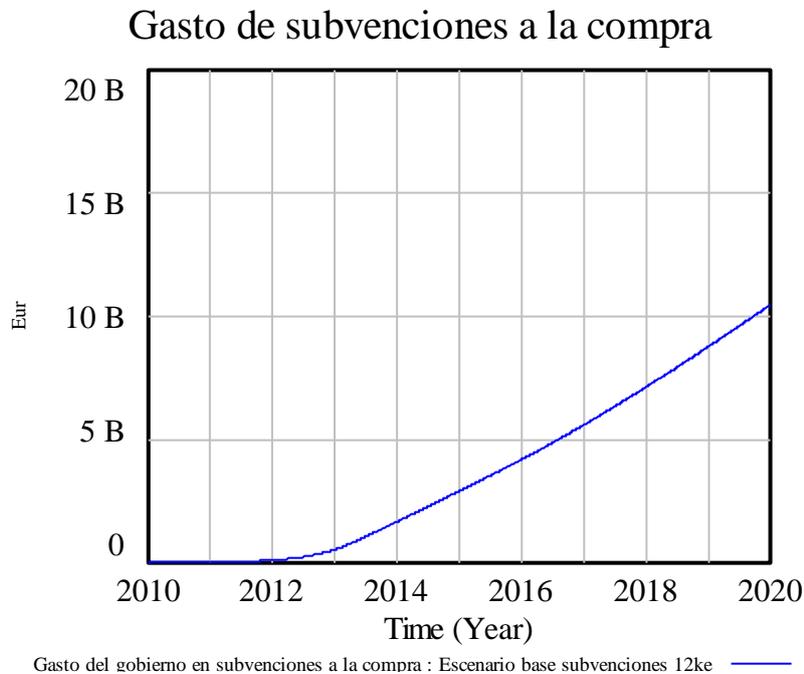
Como se puede ver, a partir de valores de 12.000 € de subvención no se obtienen evoluciones significativas en el número de vehículos eléctricos en funcionamiento en el año 2020. Esto se explica debido a que a pesar de que la rentabilidad económica sea clara, o al menos no se pierda dinero respecto al vehículo convencional, existen otros factores de atractivo que no se están tratando como son la autonomía, puntos de recarga, etc. y que son tan importantes como el aspecto económico. Por ello, a partir de cierto valor económico si no se mejoran el resto de factores de atractivo, el número de vehículos eléctricos en 2020 no varía significativamente.

Para el caso de una subvención de 12.000 € hasta el año 2020 se ve en la siguiente gráfica que no se cumplen los objetivos fijados por el Gobierno, pero la evolución es bastante similar a lo deseado.



**Figura 225: Comparativa de vehículos eléctricos en el escenario base con subvenciones de 12.000 € con los objetivos.**

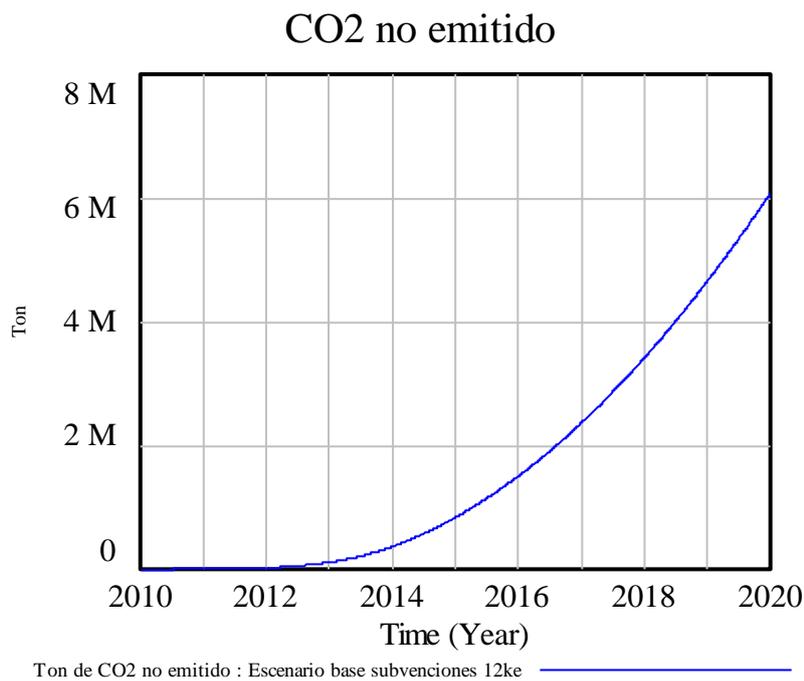
En este caso, el desembolso que debería realizar el Gobierno para obtener estos valores es el que se muestra a continuación, llegando a valores acumulados de algo más de 10.000 millones en 2020.



**Figura 226: Gasto del Gobierno en subvenciones a la compra del vehículo eléctrico en el escenario base con subvenciones de 12.000 €.**

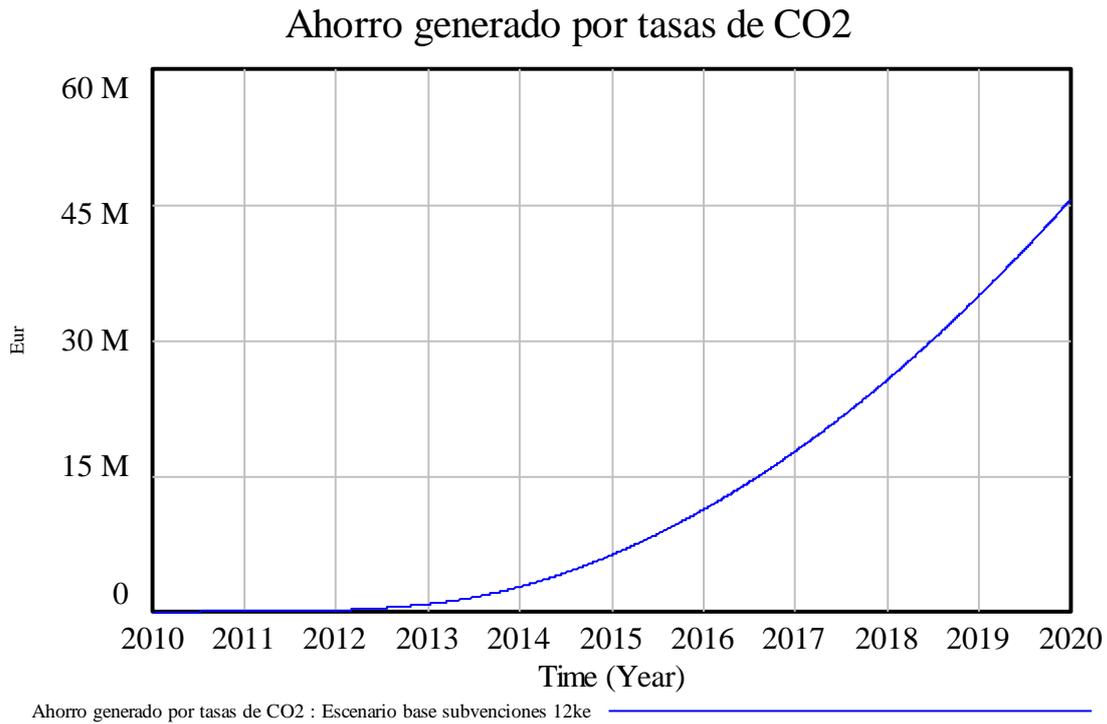
Este dato es bastante alto, como se ha visto anteriormente, puesto que el valor máximo previsto por el Gobierno en los años 2011 y 2012 es de 1.200 millones de euros.

En el caso de esta subvención con el número de vehículos eléctricos en el 2020, las toneladas de CO<sub>2</sub> no emitidas a la atmósfera serán del orden de cerca de 6 millones.



**Figura 227: Toneladas de CO<sub>2</sub> no emitidas en el escenario base con subvenciones de 12.000 €.**

Estas emisiones de CO<sub>2</sub> no emitidas tienen una repercusión económica mostrada a continuación.



**Figura 228: Ahorro económico por las toneladas de CO<sub>2</sub> no emitidas en el escenario base con subvenciones de 12.000 €.**

Tal y como se ha explicado, todos estos escenarios van a estar muy influenciados por parámetros no variados en ellos (puesto que se ha tomado los valores del escenario base) como son el precio del petróleo y el precio de la electricidad.

A medida que el precio de la gasolina aumente, la proporción de vehículos eléctricos también lo hará, puesto que será más rentable económicamente hablando que el vehículo convencional. El resultado inverso se obtendrá si el precio de la electricidad aumenta, lo que hará al vehículo eléctrico menos rentable que al de combustión interna.

En el modelo de 2010 debido a la mayor demanda prevista, se podía determinar una franja en la que se encuentra el número de vehículos eléctricos atendiendo al valor de la subvención a partir de 2012 en el escenario base. Se puede ver dos zonas diferenciadas, una superior a los objetivos del Gobierno, y otra inferior.

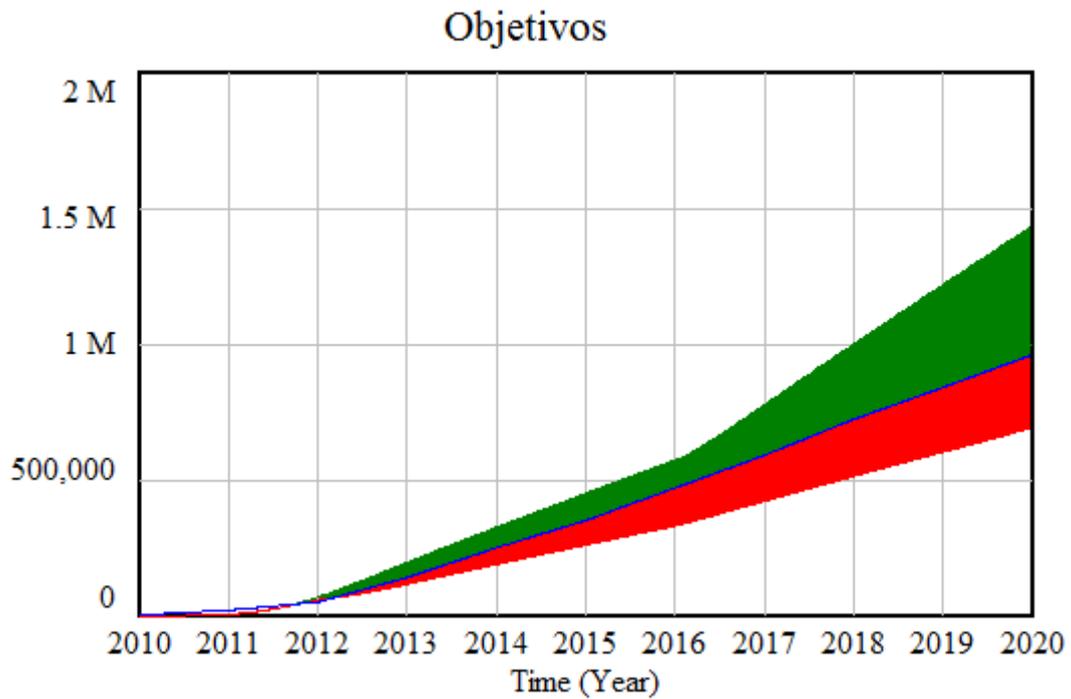


Figura 229: Rango de vehículos eléctricos, dependiendo del valor de la subvención en el modelo de 2010.

Definiendo que con una subvención de 3.500 € en el escenario base a partir de 2012 se lograban los objetivos fijados.

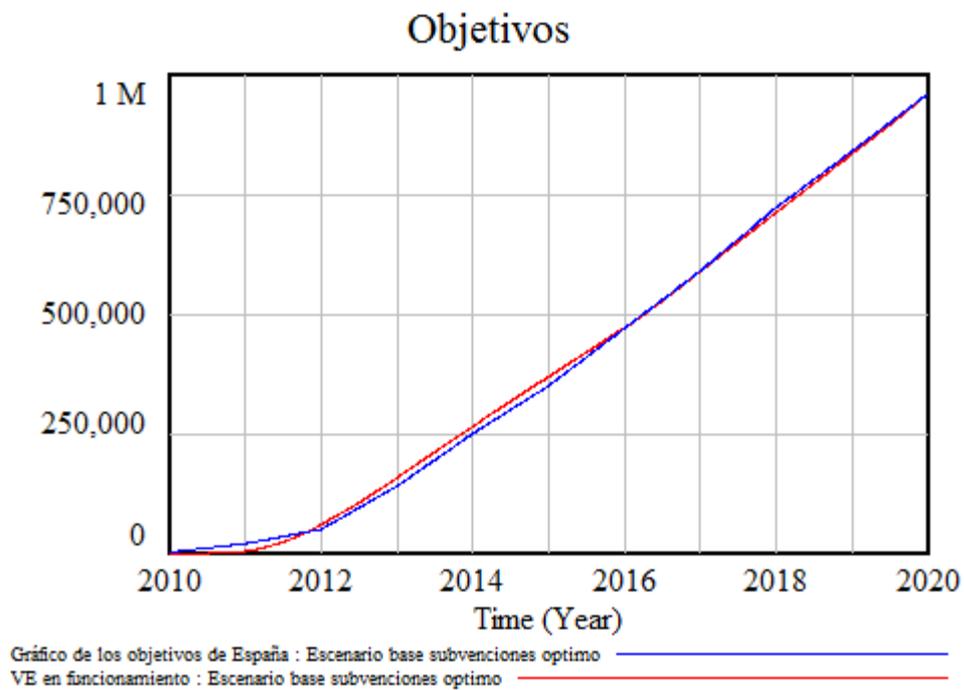
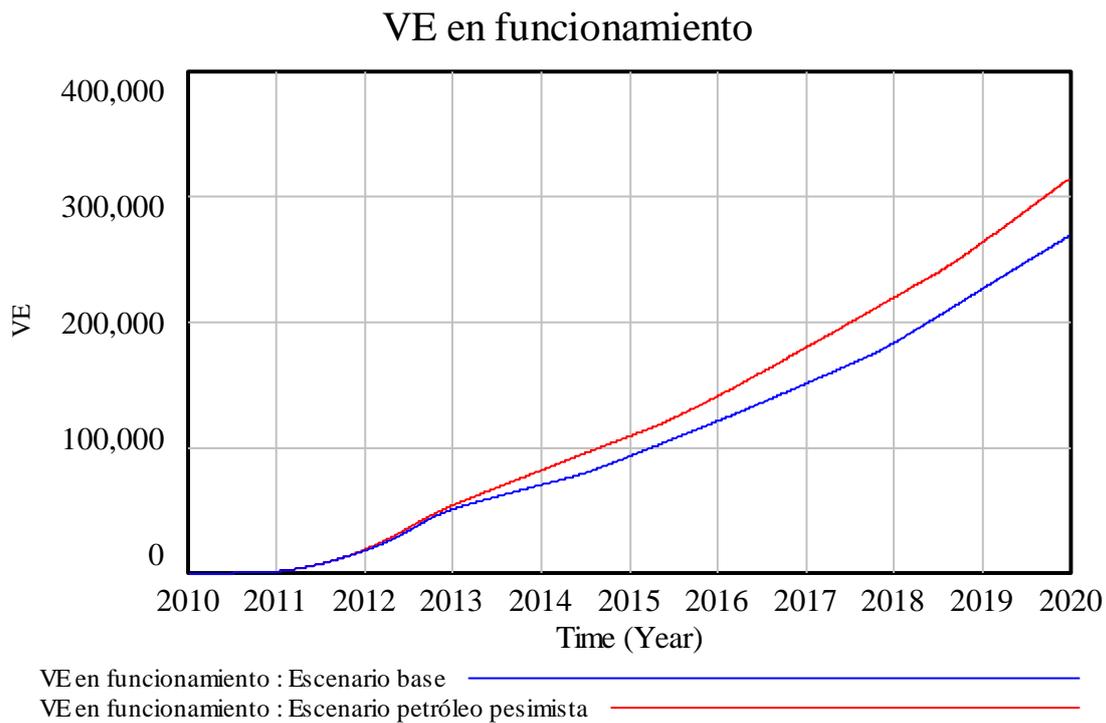


Figura 230: Comparativa del número de vehículos eléctricos con los objetivos en el base con subvenciones adaptadas a los objetivos en el modelo de 2010.

## 8.8 Escenarios de evolución del precio del petróleo

Como se ha explicado a la hora de la elección de los datos para la simulación del precio del petróleo, el determinar el precio que va a tener el petróleo a lo largo del tiempo es una tarea muy compleja plagada de incertidumbres. Debido a ello, se ha considerado interesante el poder simular el sistema con variaciones en esta variable.

Partiendo del valor del escenario base, se han considera varios escenarios de amplia variación. Uno que se ha denominado pesimista en el que el precio del petróleo se eleva un 30% respecto a la previsión utilizada. Según esto, toda la previsión del precio del petróleo aumentará un 30 % respecto al valor empleado en el escenario base. A continuación se puede observar la evolución del número de vehículos eléctricos en el escenario base y en este denominado escenario pesimista.



**Figura 231: Comparativa del número de vehículos eléctricos en el escenario base y en el escenario pesimista de evolución del precio del petróleo.**

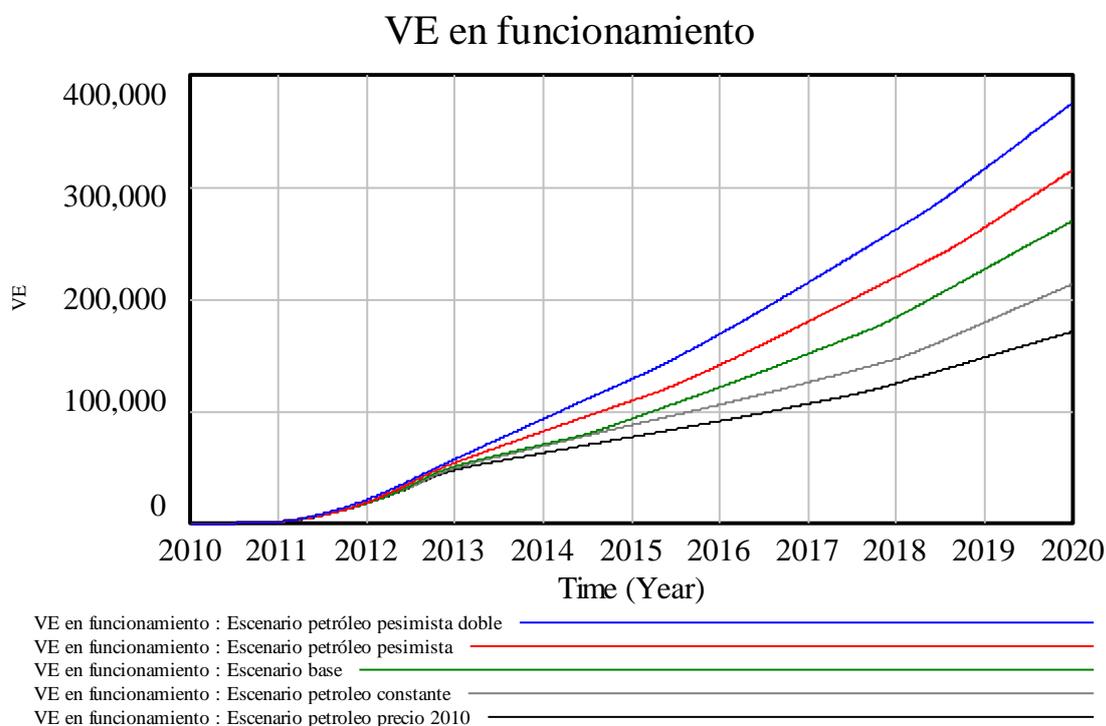
Como era de esperar, al aumentar el precio del petróleo, el número de vehículos eléctricos aumentará puesto que será una opción más atractiva para el posible consumidor que en el escenario base.

No obstante, para poder realizar un estudio de escenarios más completo, se han creado otros escenarios más extremos.

Se ha creado un escenario en el que se duplica el precio del petróleo respecto al que se ha utilizado para el escenario base. Este escenario se ha considerado para recoger situaciones de crisis energéticas o de inestabilidad políticas de una cierta magnitud.

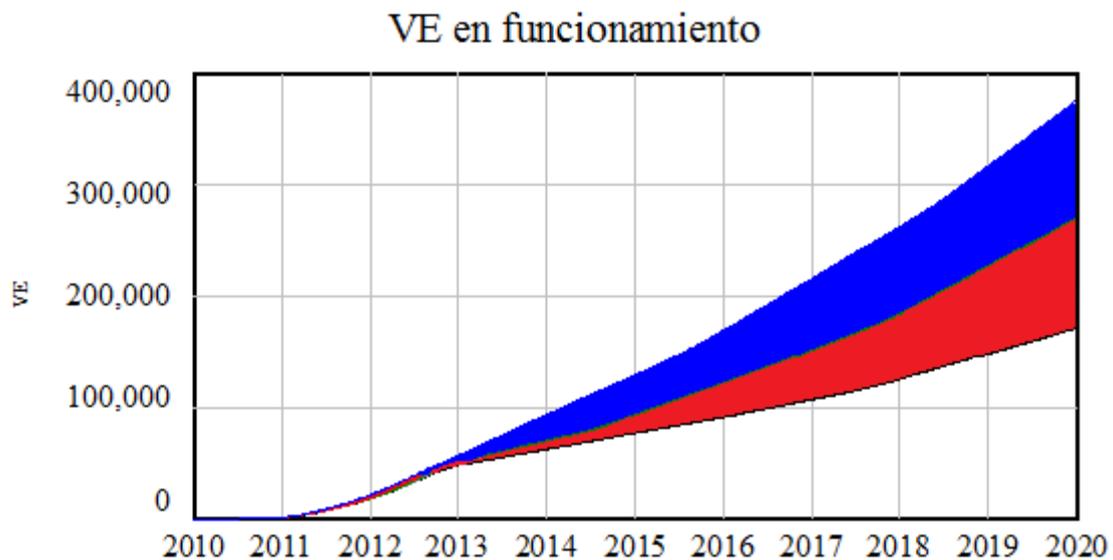
Para obtener un mayor espectro de resultados, también se han considerado dos escenarios en los que el precio del petróleo no aumenta tan significativamente, sino más bien al contrario: en el primer escenario se ha mantenido el precio del petróleo constante a su valor de 2013, mientras que en el segundo escenario se ha decrementado su precio al valor de 2010. Si bien es cierto que son escenarios poco realistas, se han incluido para poder ver la evolución del modelo frente a variaciones tanto como positivas como negativas del precio del petróleo.

En la siguiente gráfica se puede observar la evolución de todos estos escenarios comentados frente al escenario base.



**Figura 232: Comparativa del número de vehículos eléctricos en todos los escenarios de evolución del precio del petróleo.**

Esto confirma los resultados que se obtuvieron en el análisis de sensibilidad respecto al precio del petróleo. Como era de esperar, a medida que el precio del petróleo va aumentando, el número de vehículos eléctricos también lo hará debido a que resulta más atractivo, originado por el ahorro económico. Si bien es cierto que no existirá un ahorro económico a la hora de la adquisición del vehículo, si existirá dicho ahorro a lo largo de la vida útil de utilización del vehículo eléctrico. A continuación se puede observar un gráfica en la que se puede ver la variación de los vehículos eléctricos existentes en función del precio del petróleo.



**Figura 233: Rango de vehículos eléctricos en función de la evolución del precio del petróleo superior (azul) o inferior (rojo) a la fijada como escenario base.**

La zona de color azul representa un precio del petróleo más elevado que el contemplado en el escenario base, mientras que la zona de color rojo representa lo contrario, es decir un precio del petróleo inferior al previsto en el escenario base.

Atendiendo a los valores, existe una diferencia de más del doble de vehículos eléctricos entre los dos escenarios más extremos, siendo el resultado para el de menor incremento del precio del petróleo de 171.000 vehículos mientras que para el de un mayor aumento del precio es de 375.000 vehículos eléctricos.

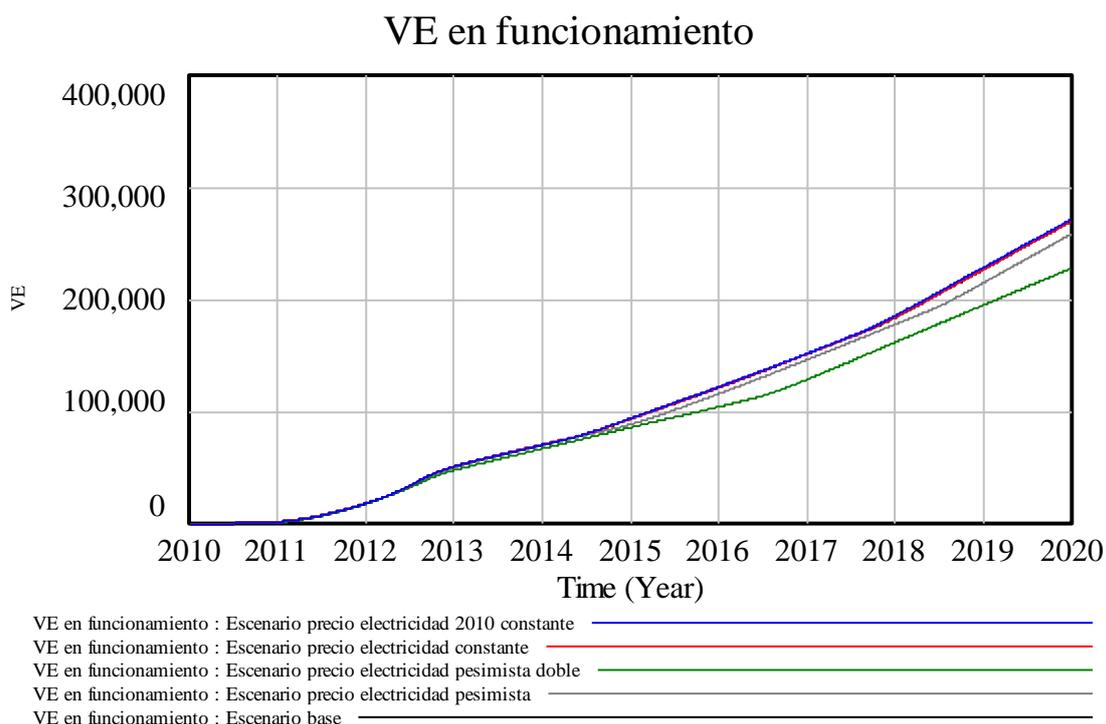
Con estos resultados se ha demostrado la gran influencia que va a tener en la implantación del vehículo eléctrico el precio el petróleo, variando enormemente los resultados obtenidos.

## 8.9 Escenarios de evolución del precio de la electricidad

Al igual que se ha comentado respecto al precio del petróleo, existe una situación similar con el precio de la electricidad. A pesar de que el precio de la electricidad va a tener una cierta fluctuación no parece ser tan volátil como el precio del petróleo. No obstante, se han creado ciertos escenarios para su estudio.

De una manera similar a los escenarios del precio del petróleo, se ha creado un escenario pesimista que contendrá un incremento del 30% del precio de la electricidad, un escenario que duplica la previsión de precio de la electricidad, un escenario en el que se mantiene constante el precio de la electricidad a partir de 2013 y por último un escenario en el que se mantiene el precio de la electricidad del año 2010.

En la siguiente gráfica se puede ver una comparativa de los vehículos eléctricos en cada uno de dichos escenarios.



**Figura 234: Número de vehículos eléctricos en cada escenario de evolución del precio de la electricidad.**

Al comparar los resultados con los obtenidos para la evolución del precio del petróleo, se ve que la afectación al sistema del precio de la electricidad es muy inferior

al del precio de la electricidad como también se demostró en los análisis de sensibilidad de ambas variables. En este caso entre los escenarios extremos solamente existe una variación de aproximadamente 44.000 vehículos eléctricos. De hecho, el único escenario que se aleja del resto es el escenario en el que existe un gran aumento del precio de la electricidad. En el caso del escenario pesimista con un aumento del 30% del precio, no implica un descenso demasiado alarmante del número de vehículos eléctricos que circulan en el año 2020 respecto al escenario base. Esta misma situación ocurre cuando el precio de la electricidad permanece constante o incluso cuando baja. Entre el escenario de un aumento del precio de la electricidad del 30% y el escenario de un menor precio de la electricidad, únicamente existe una diferencia de 13.000 vehículos en el año 2020.

Este resultado justifica el estado temporal de la investigación puesto que el número de clientes potenciales sigue estando en una fase muy temprana (innovadores) y no se verán afectados tan negativamente por el aumento del precio de la electricidad como se puede esperar en una fase de implantación del vehículo eléctrico más avanzada.

### **8.10 Escenarios de evolución del mix eléctrico**

Se ha considerado interesante incluir escenarios de evolución del mix eléctrico en España. Si bien es cierto que a priori no va a influir en el resultado de número de vehículos eléctricos que van a circular por las carreteras españolas en el año 2020 (debido a la influencia que posee en el atractivo de un vehículo como se vio en el capítulo correspondiente), sí que va a tener un impacto muy significativo en las emisiones de CO<sub>2</sub> que dichos vehículos van a dejar de emitir y por tanto en el ahorro económico que se va a obtener por la no emisión de CO<sub>2</sub>.

Como se ha explicado en el capítulo del medioambiente, el mix eléctrico está directamente relacionado con las emisiones *Well-To-Tank* que va a producir el vehículo eléctrico. Para poder determinar en qué manera el mix influye, se ha creado varios escenarios posibles a analizar además del escenario base.

El primer escenario a analizar es el que posee un mix eléctrico como el alemán, que a su vez va a permitir comprender la influencia del carbón puesto que dicho mix está dominado por el mismo con un 43%.

### MIX ALEMANIA 2009

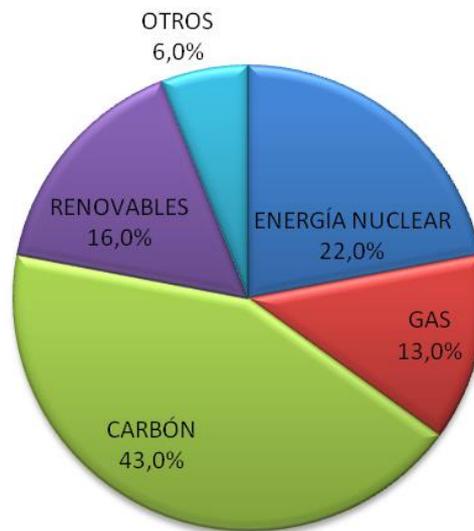


Figura 235: Mix eléctrico en Alemania en 2009 [Bickert11].

El siguiente escenario estudiado corresponde con la previsión que existe para el mix eléctrico europeo en el año 2020. En él se va a poder analizar las consecuencias de un sistema casi repartido en cuatro cuartos prácticamente similares en cuanto a peso específico dentro del mix, definidos por renovables, carbón, gas y energía nuclear

### PREVISIÓN MIX EUROPEO 2020

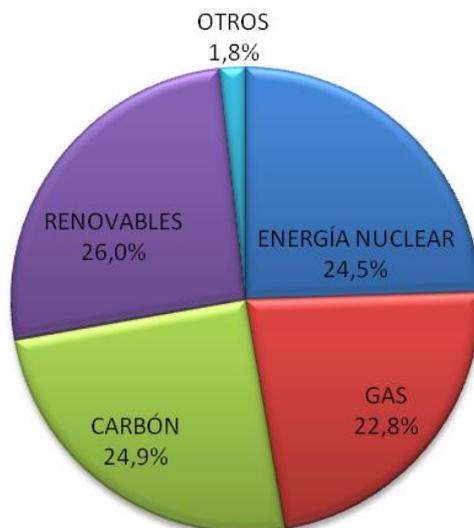


Figura 236: Previsión mix eléctrico Europeo en 2020 [Ree].

Por último se ha considerado un escenario basado en el informe de Pricewaterhouse Coopers sobre el modelo eléctrico español en 2030 [Pricewaterhouse10]. En él, se estima una cobertura de la demanda con un 50% de

electricidad a partir de tecnologías de generación renovable y un alargamiento de la vida de las centrales nucleares existentes hasta los 60 años a excepción de la de Garoña. Este escenario se ha denominado Renovables.

### MIX RENOVABLES

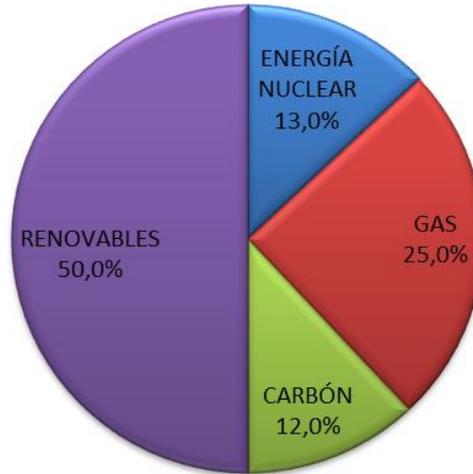


Figura 237: Mix del escenario renovables [Pricewaterhouse10].

En la siguiente gráfica se puede observar la evolución de las emisiones de CO<sub>2</sub> en los diversos escenarios para un mismo número de vehículos eléctricos en 2020.

### Ton de CO2 no emitido

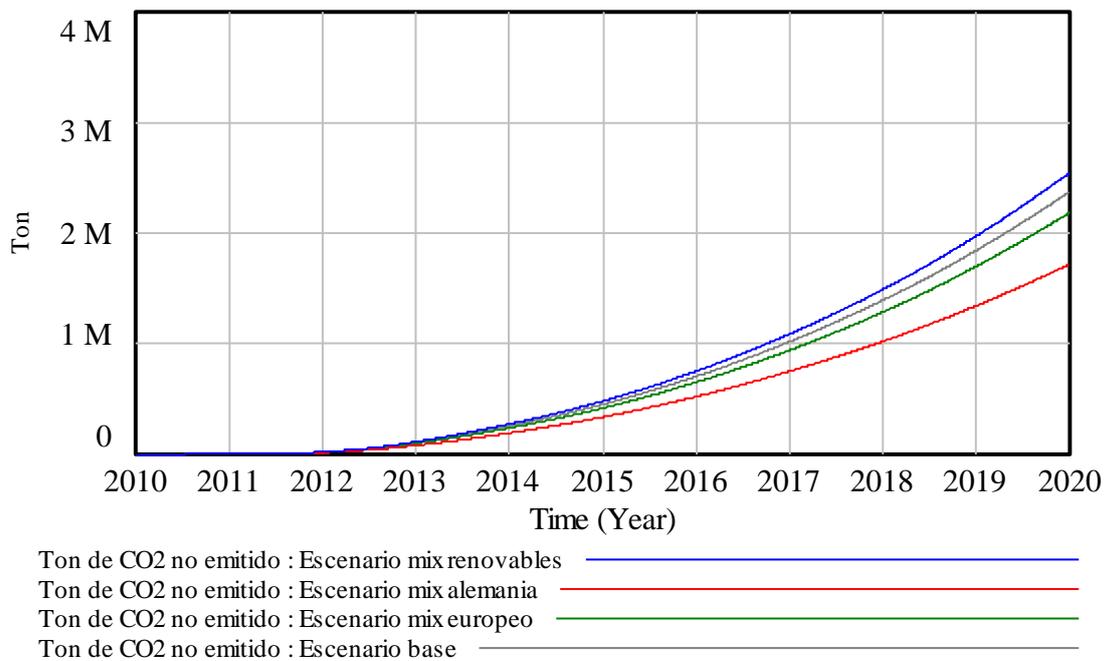
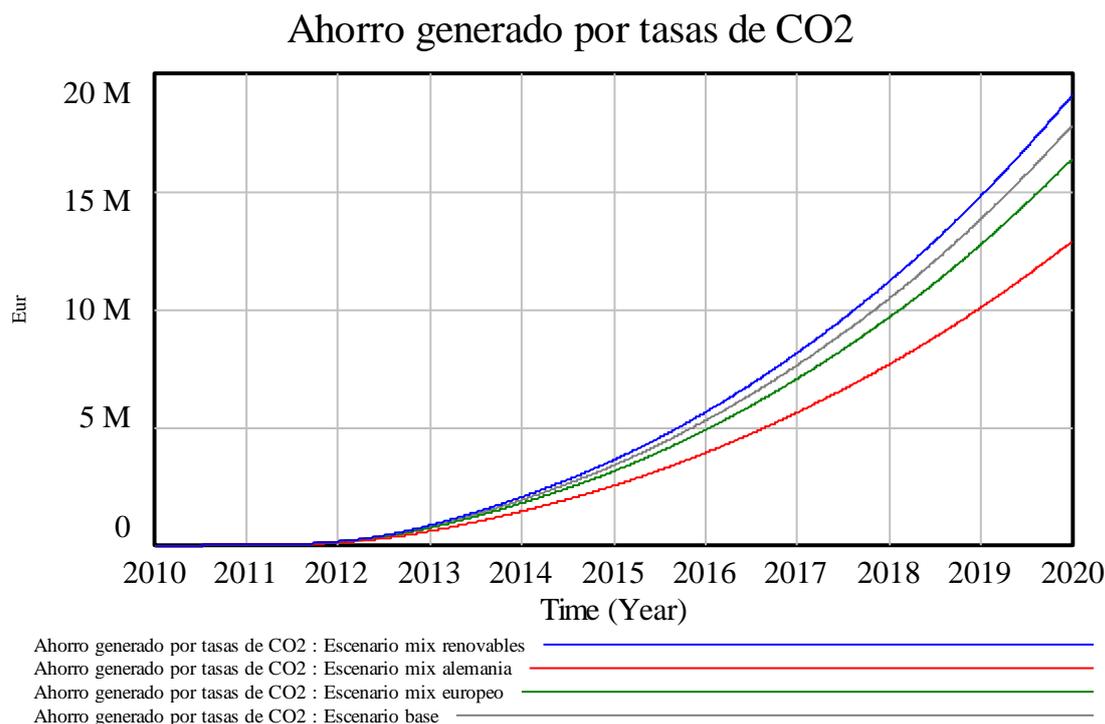


Figura 238: Emisiones de CO<sub>2</sub> no emitidas en cada escenario con diferente mix eléctrico.

Comparando los dos escenarios extremos, en el escenario con el mix eléctrico alemán, las emisiones de CO<sub>2</sub> no emitidas serán de 1.700 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>, mientras que en el escenario renovables se obtienen 2.500 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> no emitidas.

Al transformar estas emisiones no emitidas en términos económicos los datos son más significativos aún.



**Figura 239: Ahorro económico por las emisiones de CO<sub>2</sub> no emitidas en cada escenario con diferente mix eléctrico.**

En el caso del mix alemán, el ahorro económico será de 12,89 millones de euros mientras que en el escenario renovables es de más de 19 millones de euros para el mismo número de vehículos en circulación en el año 2020.

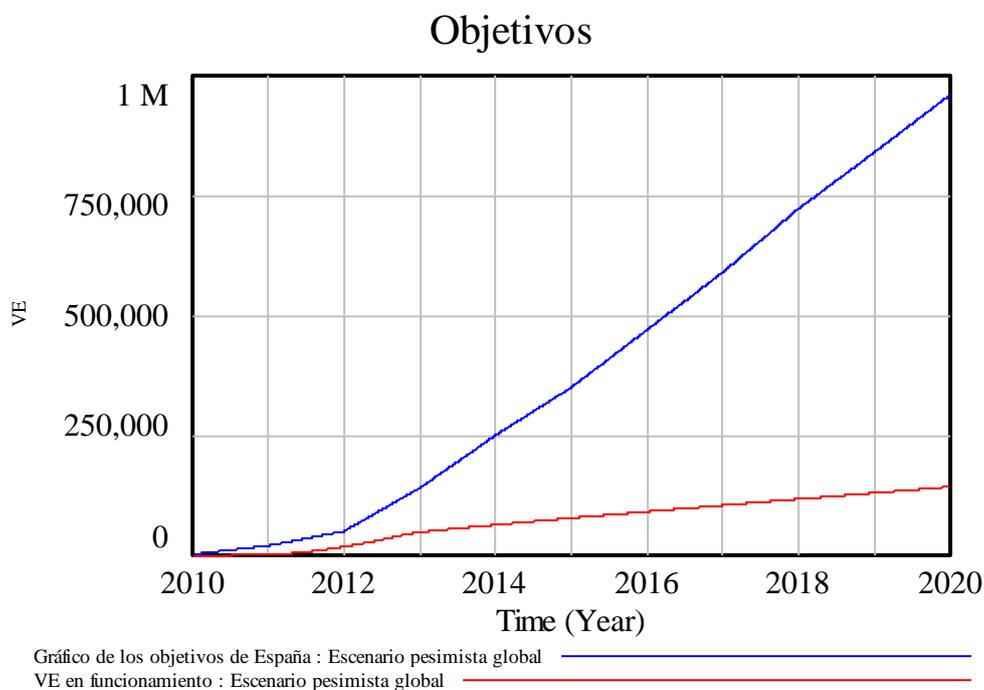
A la vista de los resultados, queda probada la importancia no sólo medioambiental sino también económica, del mix eléctrico existente. A medida que el mix tenga una mayor componente renovable se obtendrá un mayor rendimiento económico y medioambiental, mientras que por el contrario si existe una gran componente de carbón o en menor medida de gas, el beneficio medioambiental y económico que se obtendrá se verá reducido drásticamente.

## 8.11 Escenarios optimistas y pesimistas globales

Para finalizar con el análisis de los diversos escenarios en los vehículos eléctricos, se van a estudiar dos escenarios globales en el que varios parámetros sean modificados simultáneamente.

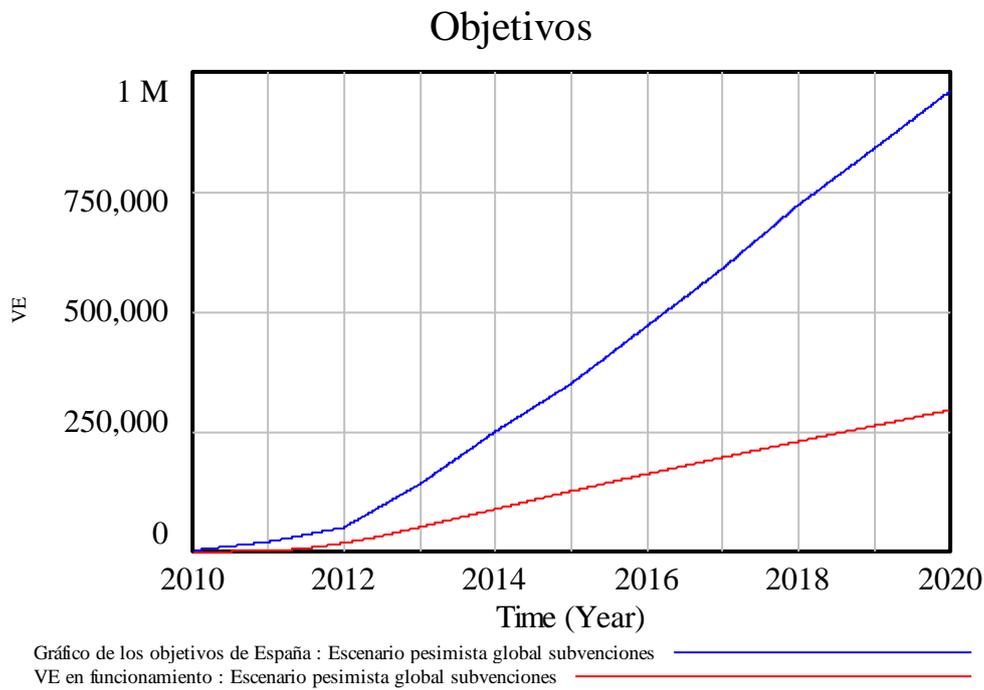
El primero de estos dos escenarios, se va a denominar escenario pesimista global, en el cual se van a juntar los valores de los escenarios pesimistas analizados con anterioridad: valor pesimista real del aumento de la capacidad de la batería (a pesar de que el aumento del 1% anual era el valor pesimista, se comprobó en las simulaciones anteriores que el valor con el que se obtenían peores resultados era con el aumento de la capacidad de un 4% anual), valor pesimista de la evolución del coste de la batería (descenso del 4% anual), no implantación de estaciones de intercambio de baterías, mantenimiento del precio del petróleo constante a partir del 2013 y un incremento del precio de la electricidad del 30% respecto al escenario base.

En este caso, el número de vehículos eléctricos en 2020 difiere mucho del objetivo del Gobierno con el presupuesto para subvenciones actual.



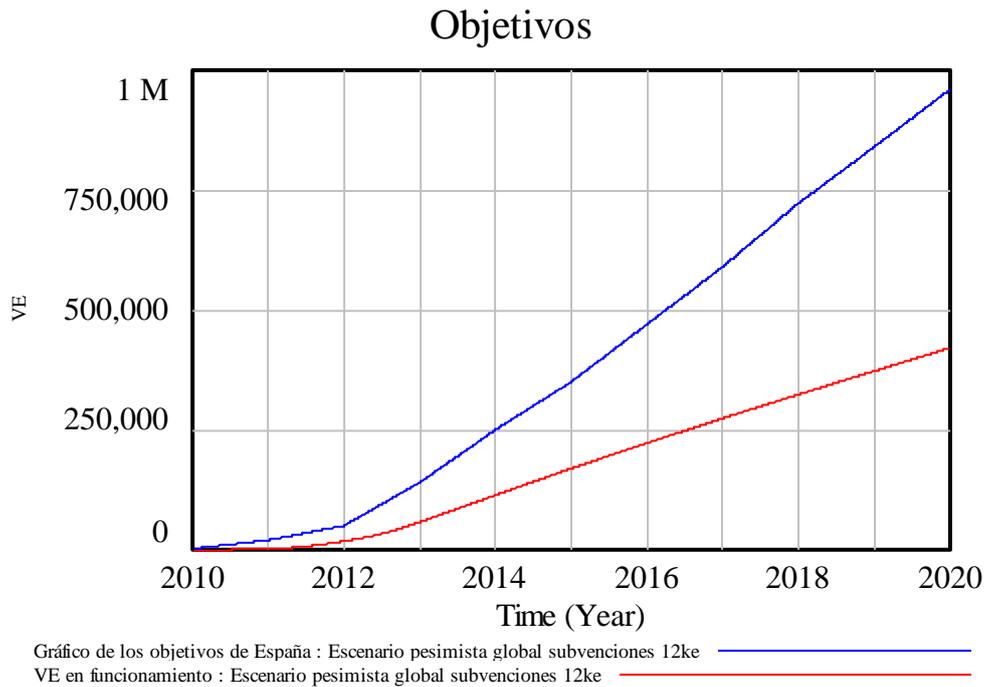
**Figura 240: Comparativa del número de vehículos eléctricos con los objetivos en el escenario pesimista global con las subvenciones actuales.**

Si se asume que las subvenciones actuales de 6.000 € continuarán a partir de 2012, los valores que se obtienen son diferentes.



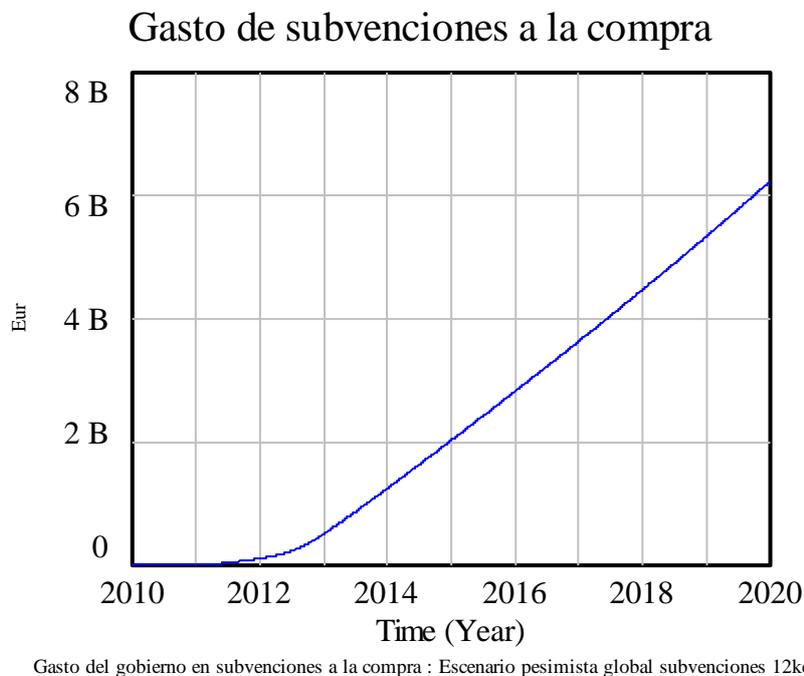
**Figura 241: Comparativa del número de vehículos eléctricos con los objetivos en el escenario pesimista global, sin disminuir la subvención a la compra.**

Los resultados quedan enormemente alejados de los fijados como objetivo. En el caso de aumentar la subvención hasta los 12.000 € hasta el 2020 los resultados serían notablemente diferentes.



**Figura 242: Comparativa del número de vehículos eléctricos con los objetivos en el escenario pesimista global con subvención a la compra de 12.000 €.**

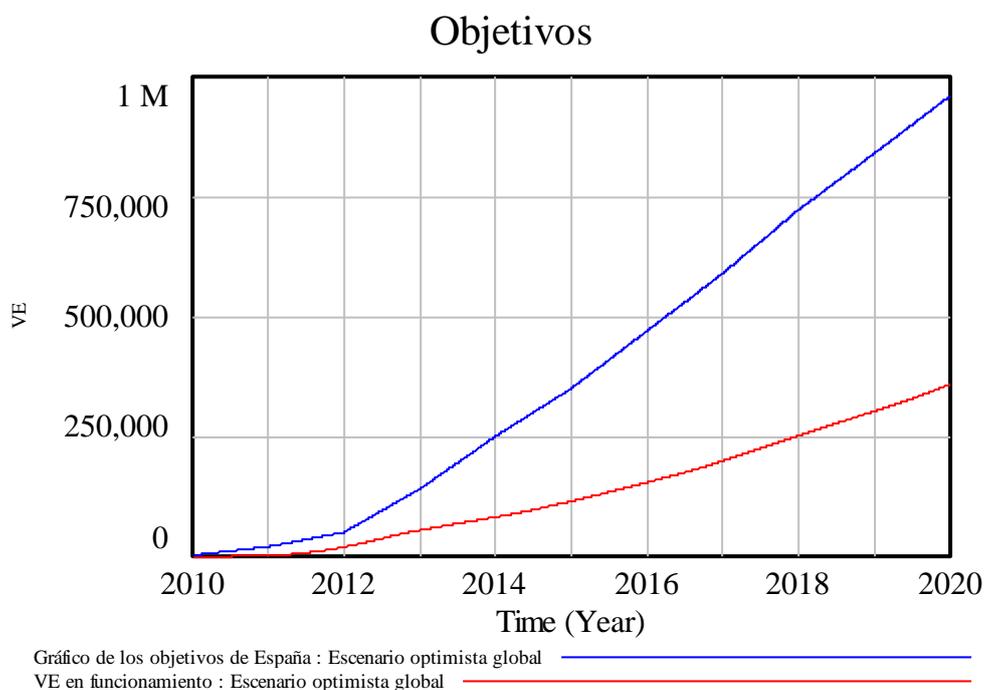
Con un gasto del Gobierno superior a los 6.000 millones de euros en subvenciones de compra.



**Figura 243: Gasto del Gobierno en subvenciones a la compra del vehículo eléctrico en el escenario pesimista global con subvenciones de 12.000 €.**

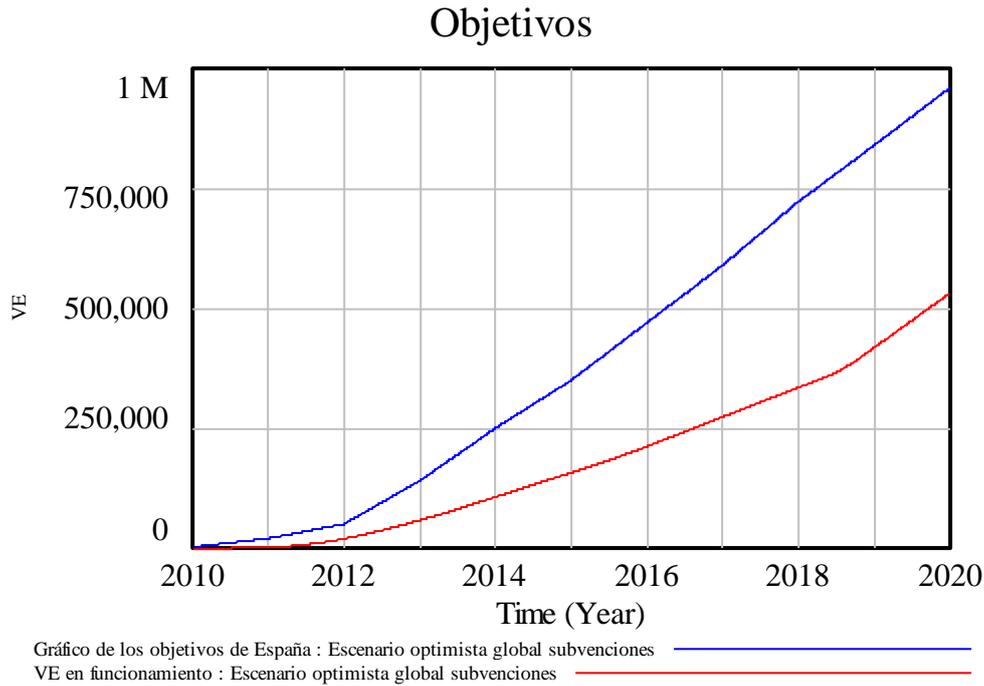
El segundo de estos dos escenarios, se va a denominar escenario optimista global, en el cual se van a juntar los valores de los escenarios optimistas analizados con anterioridad: valor optimista del aumento de la capacidad de la batería (aumento del 1% anual por el motivo explicado anteriormente), valor optimista de la evolución del coste de la batería (descenso del 10% anual), valor optimista del número de estaciones de intercambio de baterías (el doble que el valor del escenario base), aumento del precio del petróleo el 30% a partir del 2013 y manteniendo el precio de la electricidad constante a partir de 2013.

Con estos valores, el número de vehículos eléctricos en 2020 difiere del objetivo del Gobierno con el presupuesto para subvenciones actual, pero de una manera muy inferior a la del escenario pesimista.



**Figura 244: Comparativa del número de vehículos eléctricos con los objetivos en el escenario optimista global con las subvenciones actuales.**

Si se asume que las subvenciones actuales de 6.000 € continuarán a partir de 2012, los valores que se obtienen los siguientes valores y su comparativa con los objetivos gubernamentales.



**Figura 245: Comparativa del número de vehículos eléctricos con los objetivos en el escenario optimista global, sin disminuir la subvención a la compra.**

Se puede observar que los resultados quedan bastante lejos de los objetivos. Al igual que se hacía con el escenario pesimista global, en este caso también se va a intentar optimizar la subvención para intentar cumplir los objetivos fijados para el año 2020, o al menos estar lo más próximo posible.

Con una subvención de 12.000 € se obtiene un valor relativamente próximo al del fijado por el Gobierno para 2020 en comparación con el resto de escenarios analizados hasta el momento. De hecho es en el escenario en el que se está más próximo, lo cual también es lógico ya que es el escenario más optimista de todos.

## Objetivos

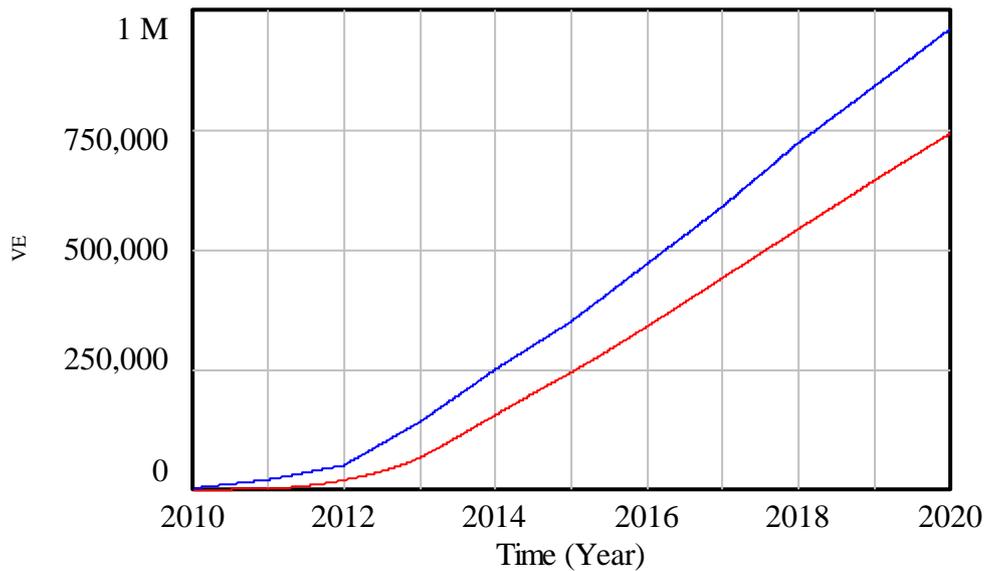
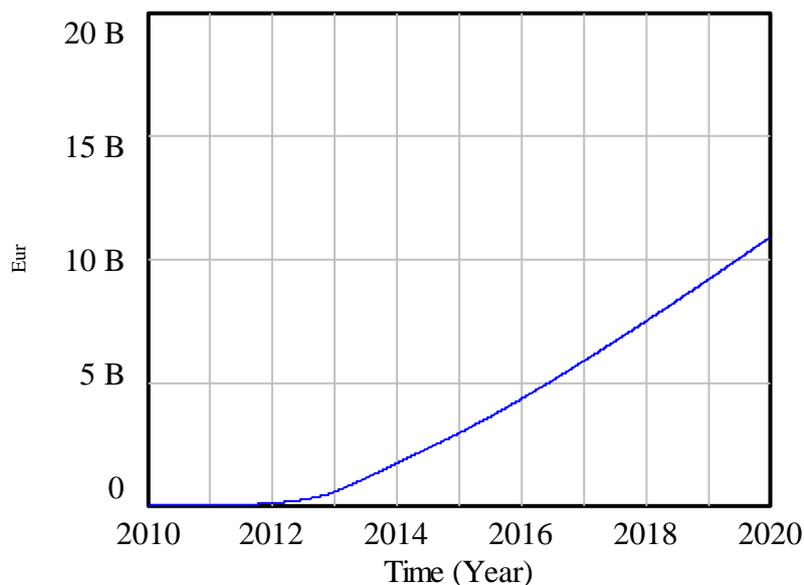


Gráfico de los objetivos de España : Escenario optimista global subvenciones 12ke ————  
VE en funcionamiento : Escenario optimista global subvenciones 12ke ————

**Figura 246: Comparativa del número de vehículos eléctricos con los objetivos en el escenario optimista global con subvenciones a la compra de 12.000 €.**

En este caso, el gasto total del Gobierno en subvenciones será de aproximadamente 12.000 millones de euros.

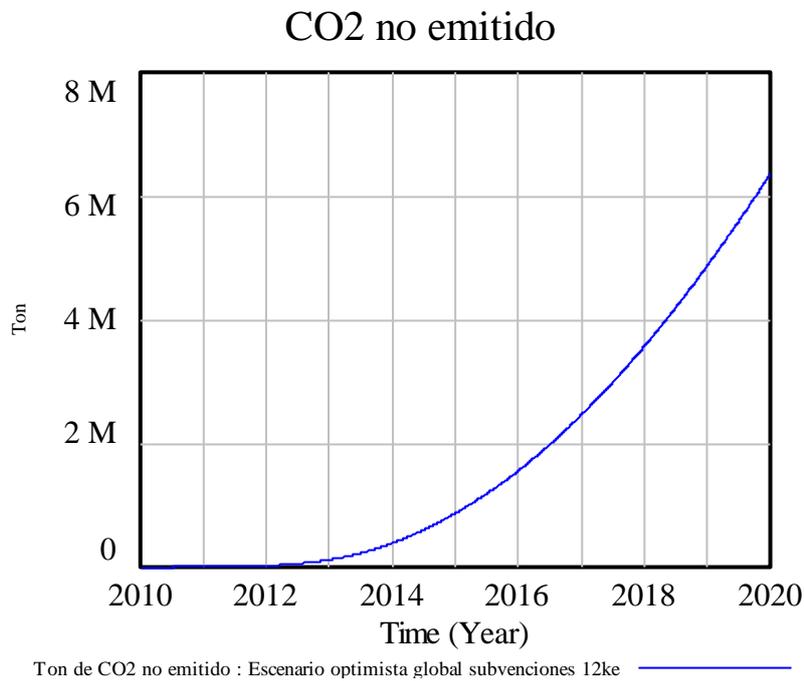
## Gasto de subvenciones a la compra



Gasto del gobierno en subvenciones a la compra : Escenario optimista global subvenciones 12ke

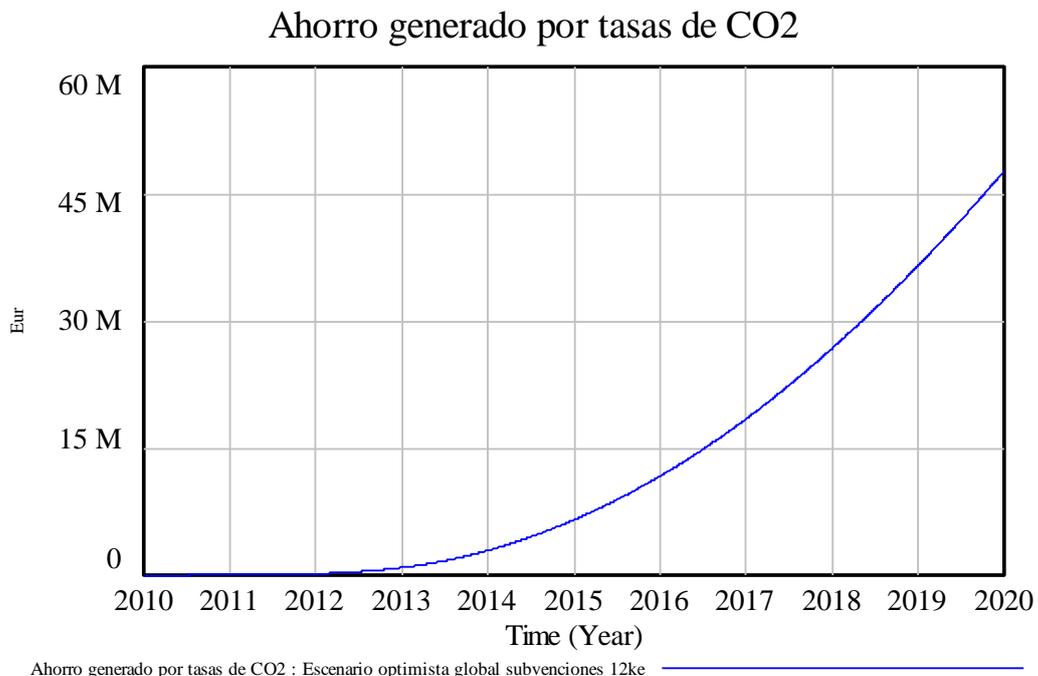
**Figura 247: Gasto del Gobierno en subvenciones a la compra del vehículo eléctrico en el escenario optimista global con subvenciones de 12.000 €.**

Las toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub> no emitidas son las que se muestran a continuación con valores superiores a los 6 millones en el mejor de los casos.



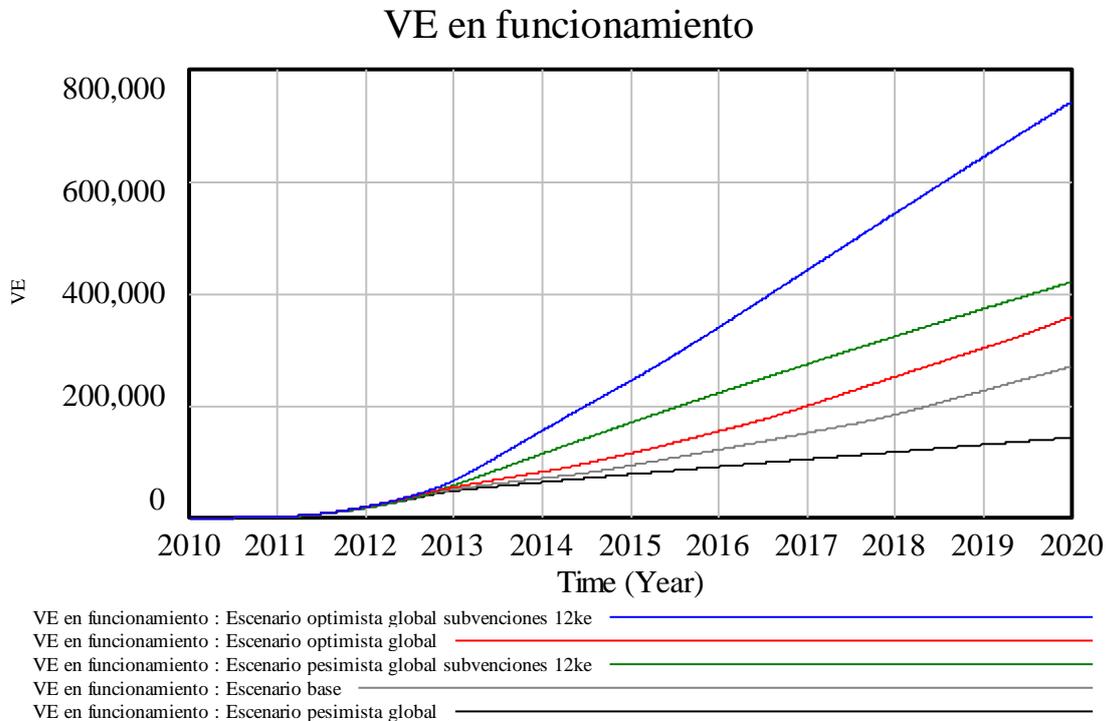
**Figura 248: Emisiones de CO<sub>2</sub> no emitidas en el escenario optimista global con subvenciones a la compra de 12.000 €.**

Esto implica un ahorro económico de más de 47 millones de euros.



**Figura 249: Ahorro económico por las emisiones de CO<sub>2</sub> no emitidas en el escenario optimista global con subvenciones a la compra de 12.000 €.**

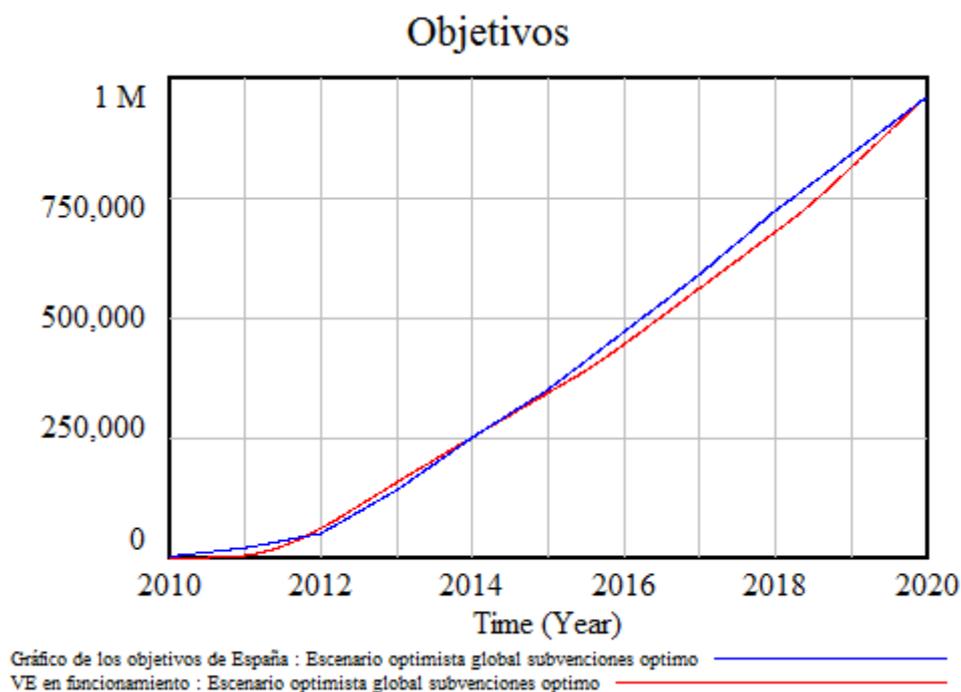
Por último, en la siguiente figura se puede ver el número de los vehículos eléctricos en los diferentes escenarios tratados. Se puede ver la clara evolución en función de las hipótesis adoptadas.



**Figura 250: Comparativa de los vehículos eléctricos en cada escenario global.**

Se ve claramente la diferencia entre el escenario optimista global y pesimista global a igualdad de valor de subvención variando aproximadamente 320.000 vehículos entre ambos.

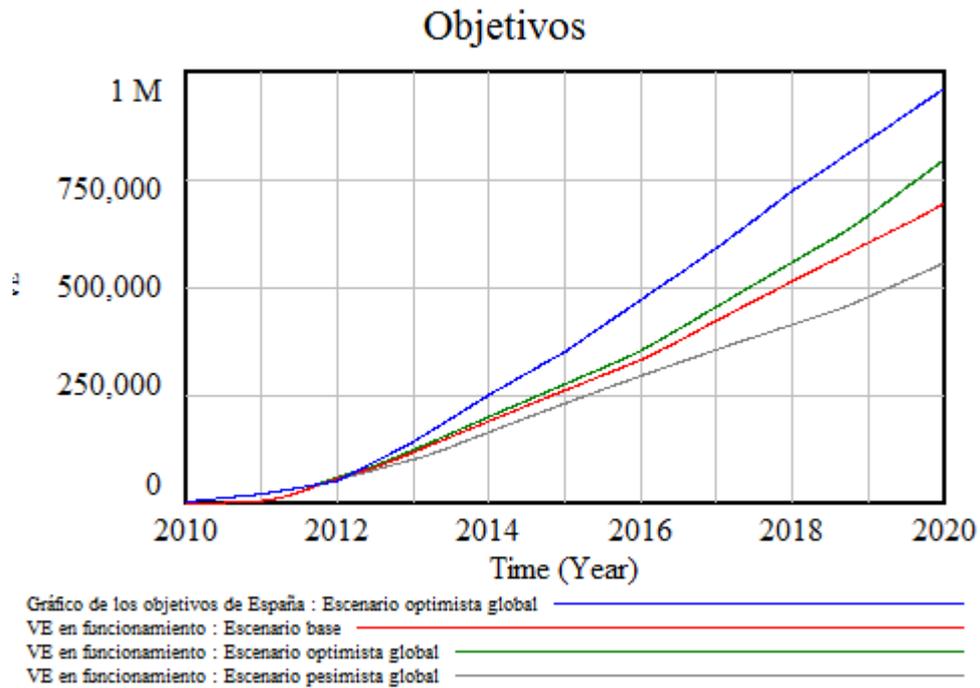
En el caso del modelo de 2010 se logran los objetivos del Gobierno para el año 2020 con una subvención de 2.000 € a partir de 2013 como se ve a continuación.



**Figura 251: Comparativa del número de vehículos eléctricos con los objetivos en el escenario optimista global con subvenciones adaptadas a los objetivos en el modelo de 2010.**

Con un gasto total del Gobierno en subvenciones de aproximadamente 2.500 millones de euros.

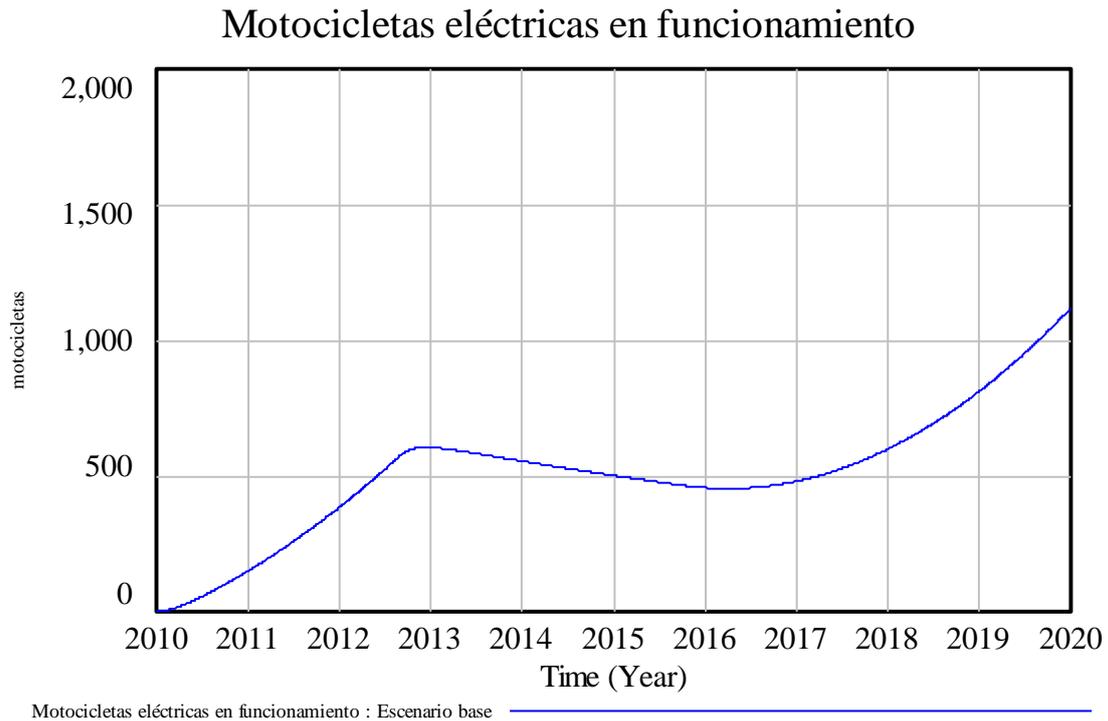
No obstante, en ningún escenario simulado se lograban los objetivos si se eliminaba la subvención en el año 2013.



**Figura 252:** Comparativa de los vehículos eléctricos en cada escenario global y su comparación con los objetivos en el modelo de 2010.

## 8.12 Escenarios de evolución de las motocicletas eléctricas

Por último se desea tratar la posible penetración en el mercado de las motocicletas eléctricas en España como consecuencia del proyecto Movele. Para ello se parte del escenario base que se utilizó en el vehículo eléctrico pero tomando como salida del mismo las motocicletas eléctricas en funcionamiento. En la siguiente figura se puede ver la evolución del número de motocicletas eléctricas en España en el escenario base.

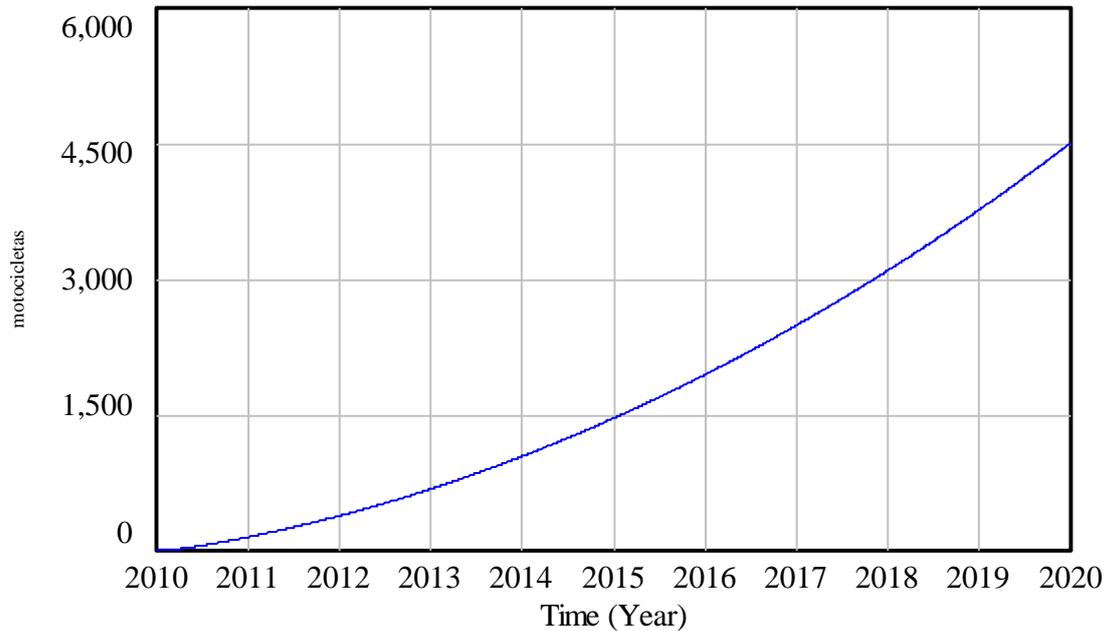


**Figura 253: Número de motocicletas eléctricas en el escenario base sin continuar la subvención a la compra.**

Se puede observar un descenso en el número a partir de la eliminación de las subvenciones a la compra. Este descenso es originado por el propio modelo ya que como se explicó anteriormente. Asume una tasa de renovación de estas motocicletas al igual que de las convencionales como puede ser por averías, accidentes, etc. Como se observa en el gráfico, los valores de motocicletas de los que se está hablando son valores ínfimos sobrepasando las 1.000 unidades en 2020. Esto es debido a que el grueso de las motocicletas eléctricas que se están vendiendo en el mercado actualmente no están incluidas en el proyecto Movele como son los ciclomotores de pequeña cilindrada.

En el caso de que las subvenciones de la compra de las motocicletas eléctricas no se limitasen, los valores obtenidos serían muy diferentes como se ven a continuación.

### Motocicletas eléctricas en funcionamiento



Motocicletas eléctricas en funcionamiento : Escenario base subvenciones

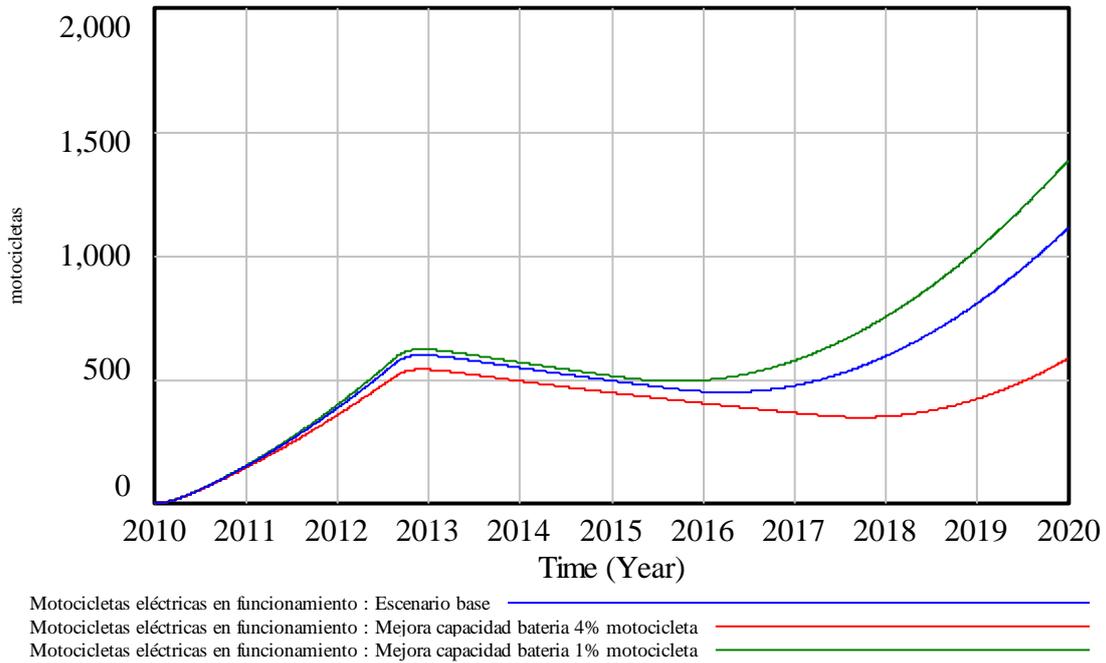
**Figura 254: Número de motocicletas eléctricas en el escenario base sin eliminar la subvención a la compra.**

Se puede ver que el hecho de mantener la subvención es lo que permite cuadruplicar el valor de las motocicletas eléctricas existentes en España en el año 2020.

A continuación se ha descrito un breve resumen de los escenarios tratados para el caso de los vehículos eléctricos, comenzando con el de la evolución de la capacidad de las baterías con variaciones del 1% y del 4% anual respecto al 2% del escenario base.

Al igual que ocurría con el vehículo eléctrico, la evolución de la capacidad de la batería si no lleva asociada un descenso en el coste de la batería es contraproducente como se puede ver en la siguiente gráfica.

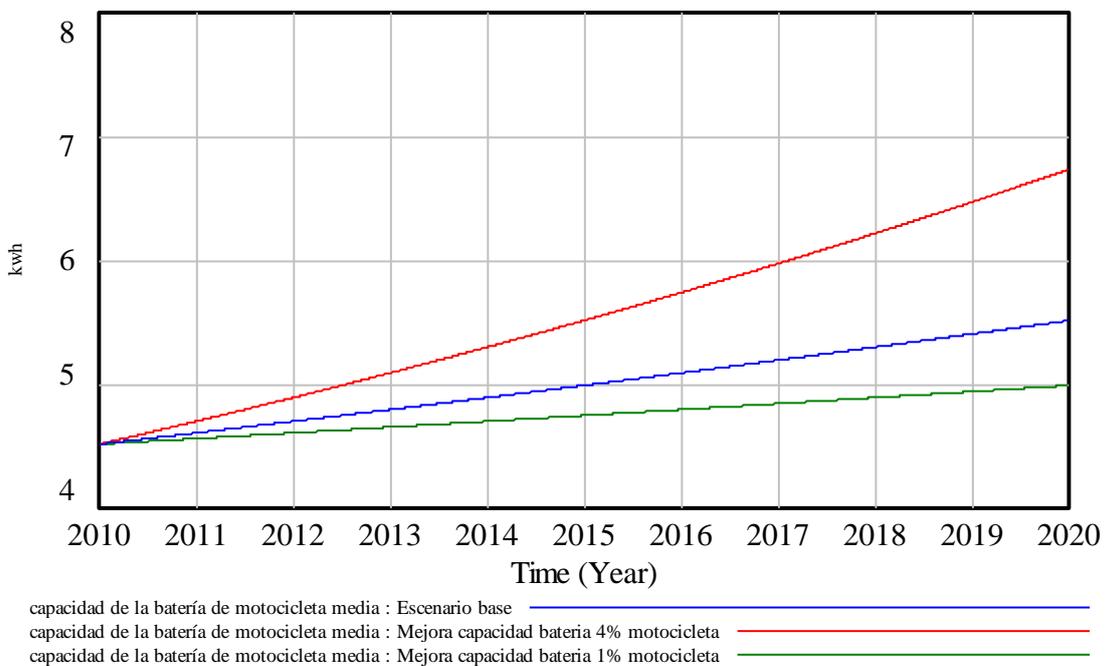
### Motocicletas eléctricas en funcionamiento



**Figura 255: Número de motocicletas eléctricas en los escenarios de mejora de la capacidad de la batería sin continuar la subvención a la compra.**

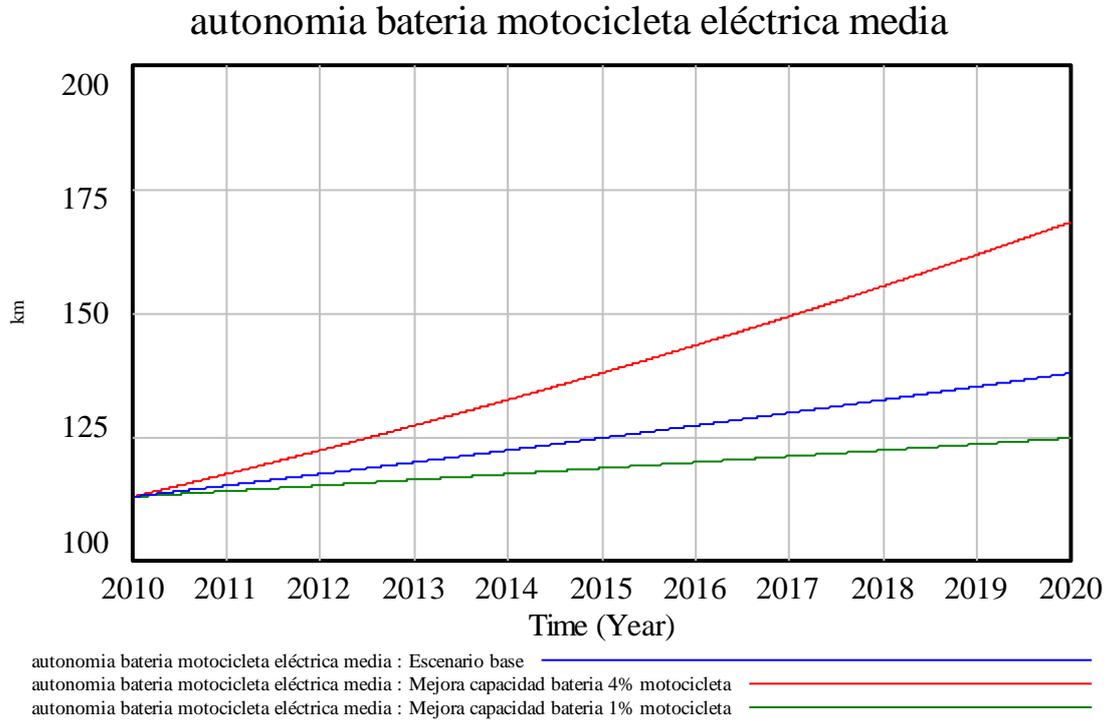
Se puede observar la evolución de la capacidad en los escenarios tratados.

### capacidad de la batería de motocicleta media



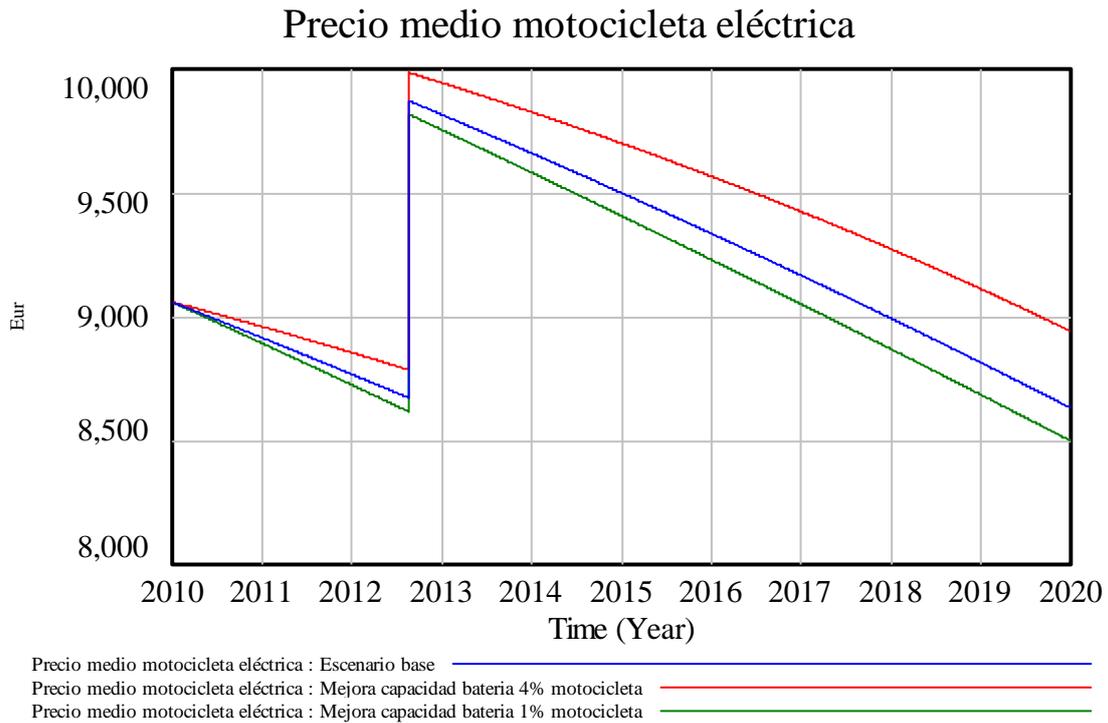
**Figura 256: Capacidad de la batería en los escenarios de mejora de la capacidad de la batería.**

Con unas autonomías asociadas



**Figura 257: Autonomía de la batería de la motocicleta eléctrica en los escenarios de mejora de la capacidad de la batería.**

Estas variaciones en la capacidad de la batería implican unas variaciones en el precio medio de las motocicletas (se recuerda que es un compendio de los precios dependiendo de las cilindradas). Aunque al ser unas baterías de un tamaño relativamente pequeño, las variaciones no llegan a ser muy significantes, variando en el peor de los casos en casi 500 €.

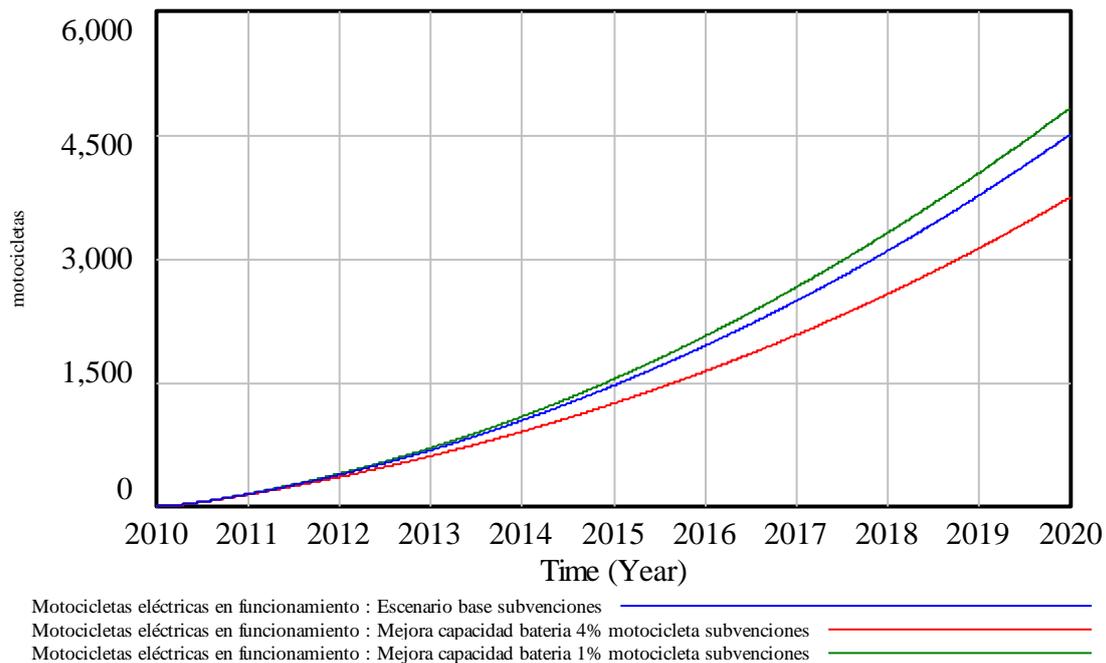


**Figura 258: Precio medio de las motocicletas eléctricas en los escenarios de mejora de la capacidad de la batería sin continuar con la subvención a la compra.**

Sin embargo, a pesar de que la diferencia de precios no parece demasiado elevada, el resultado en ambos escenarios sí que lo es, obteniendo resultados que duplican los valores de un escenario con respecto al otro.

Todos estos resultados han sido limitando las subvenciones, pero si se mantienen hasta 2020, los resultados varían enormemente.

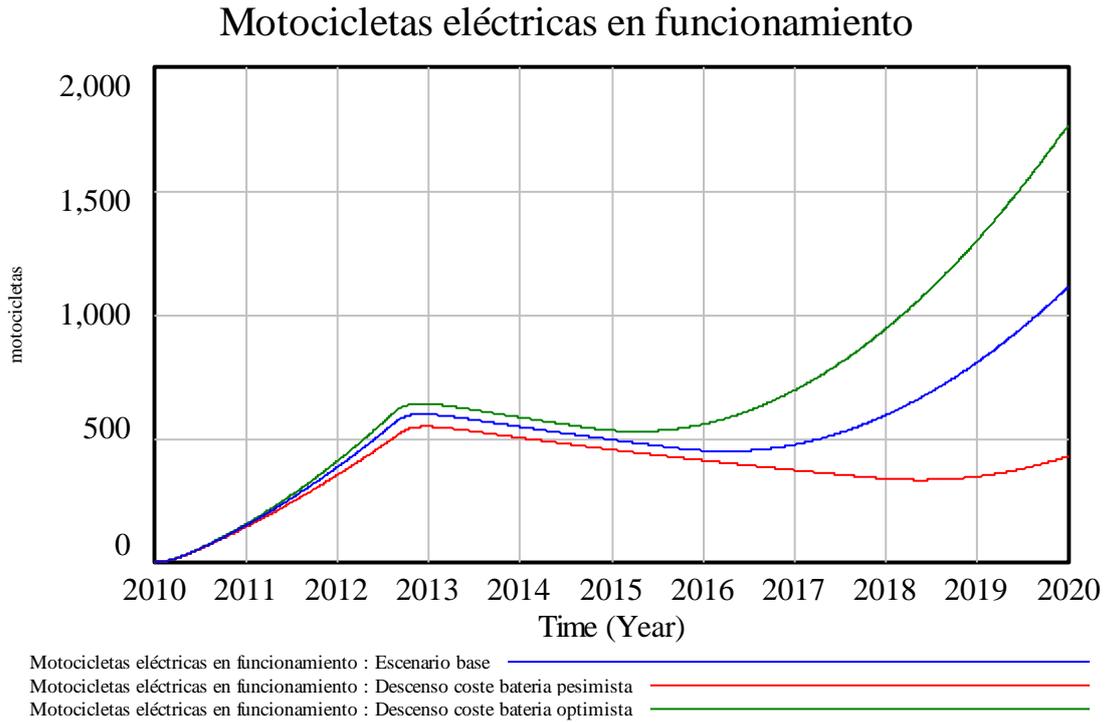
### Motocicletas eléctricas en funcionamiento



**Figura 259: Número de motocicletas eléctricas en los escenarios de mejora de la capacidad de la batería continuando con la subvención a la compra.**

En este caso, las diferencias entre los 3 escenarios no son tan grandes como eran antes, principalmente entre el escenario base y el de la menor mejora de la capacidad de la batería. Esto es debido a que en el caso de las motocicletas prima mucho más el factor económico que el factor de la autonomía puesto que el valor de la autonomía en las motocicletas eléctricas no dista demasiado de la autonomía de las motocicletas convencionales como se ha visto anteriormente.

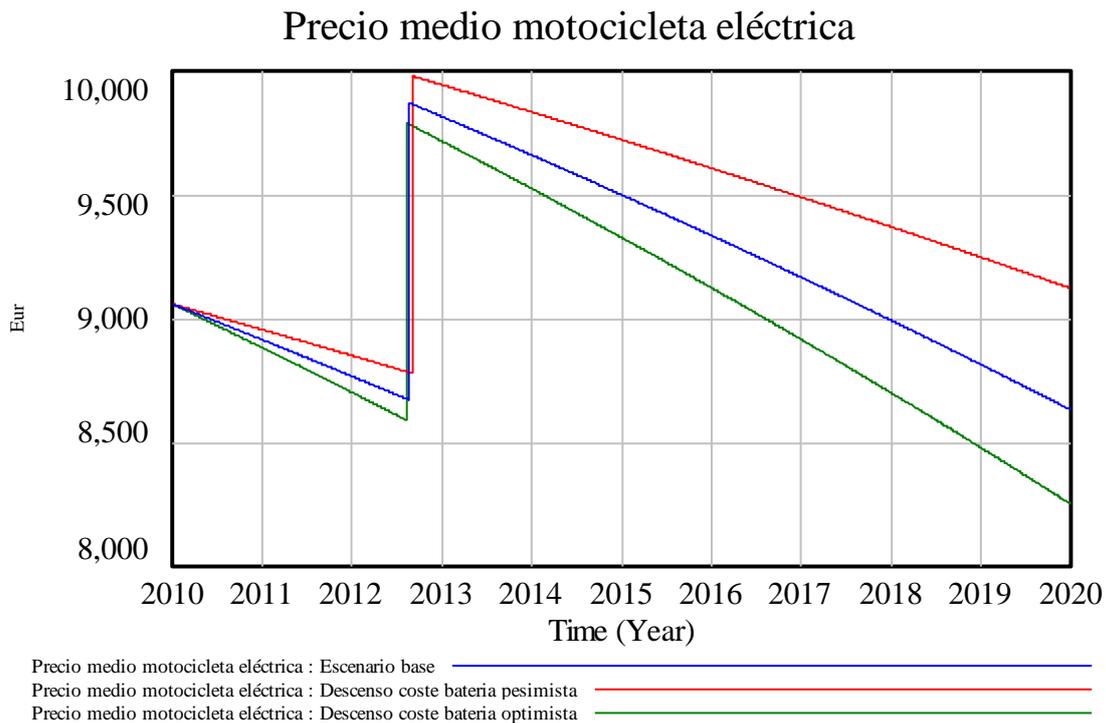
En los escenarios de variación del coste de las baterías los resultados sin prolongación de la subvención son los siguientes.



**Figura 260: Número de motocicletas eléctricas en los escenarios de descenso del coste de la batería eliminando la subvención a la compra.**

Nuevamente existen diferencias importantes entre los escenarios puesto que como se ha mencionado, el cliente prima mucho el factor económico en este tipo de vehículos.

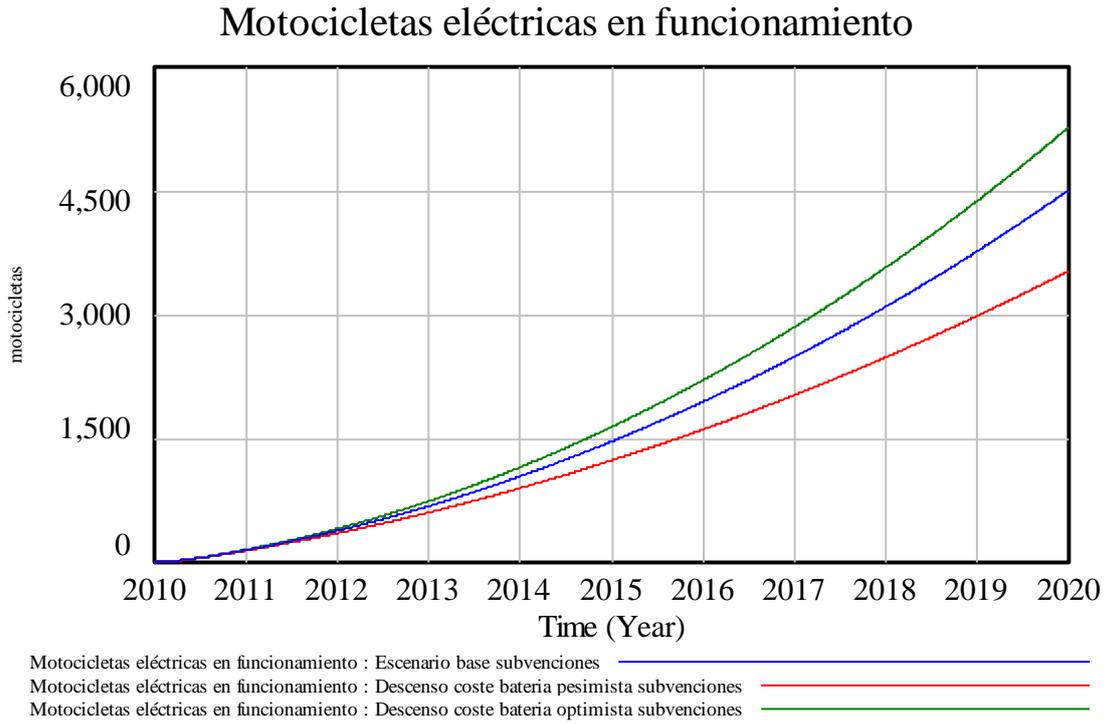
Los precios medios de las motocicletas en estos escenarios serán los siguientes.



**Figura 261: Precio medio de las motocicletas eléctricas en los escenarios de descenso del coste de la batería eliminando la subvención a la compra.**

Aquí sí que se puede observar una variación de precio significativa de casi 1.000 € entre los escenarios pesimista y optimista lo que claramente justifica la evolución del número de motocicletas eléctricas en funcionamiento en 2020.

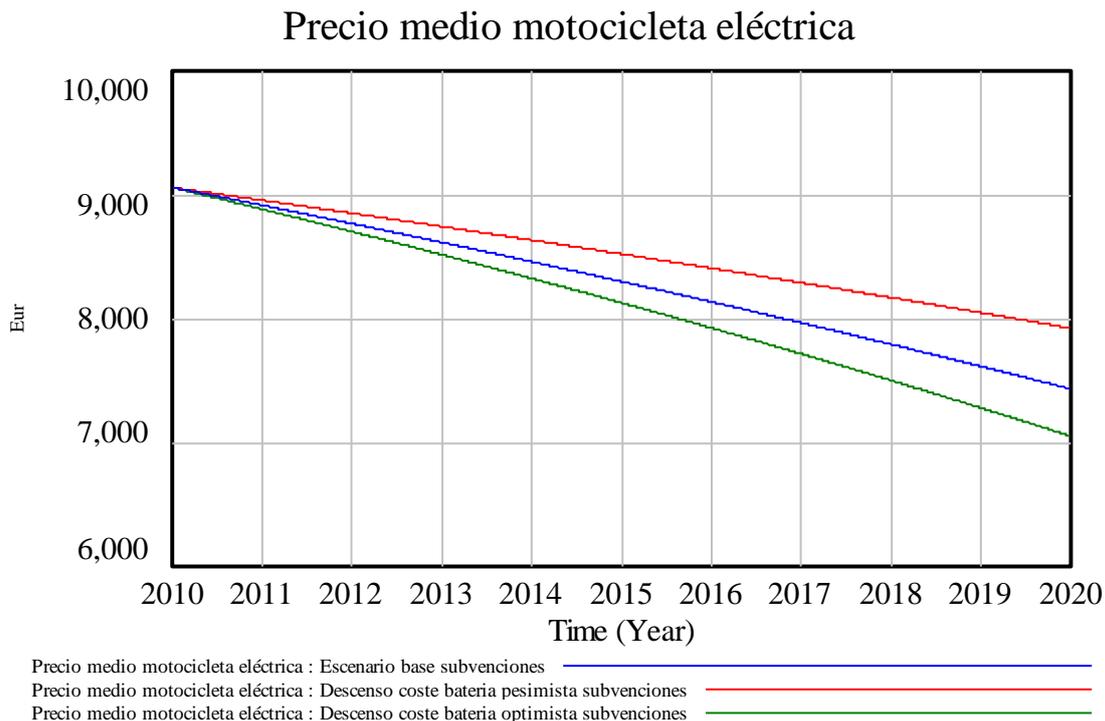
A pesar de que se ha explicado que las subvenciones a la adquisición se han eliminado en el año 2013 (Real Decreto 294/2013), se ha considerado interesante realizar una comparativa en los escenarios y entender qué pasaría en el caso de mantener las subvenciones a la compra. Los resultados son los que se muestran a continuación.



**Figura 262: Número de motocicletas eléctricas en los escenarios de descenso del coste de la batería continuando la subvención a la compra.**

Como se puede ver los resultados son mucho más elevados en todos los casos como era de esperar.

Al comparar los precios medios de las motocicletas eléctricas, la evolución es de la siguiente manera.



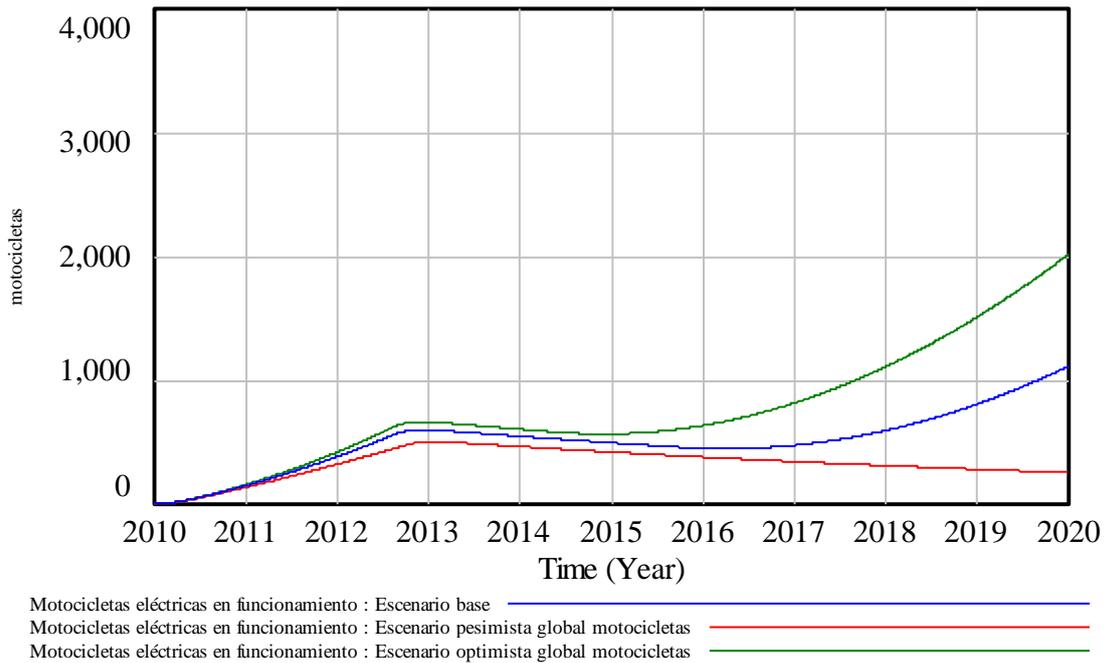
**Figura 263: Precio medio de las motocicletas eléctricas en los escenarios de descenso del coste de la batería continuando la subvención a la compra.**

Por último se van a comparar los escenarios pesimistas y optimistas globales para ver con el modelo que se ha creado los máximos resultados que se podrían obtener.

El escenario pesimista global que comprenderá una mejora de la capacidad de la batería del 4% y un descenso del coste de las baterías anual del 4%, mientras que el optimista tendrá una mejora de la capacidad de la batería del 1% y un descenso del coste de las baterías anual del 10%. No se contemplarán las estaciones de intercambio de baterías puesto que para las motocicletas no tendrán afectación.

En el caso de no prolongar las subvenciones los resultados serán los que se muestran a continuación.

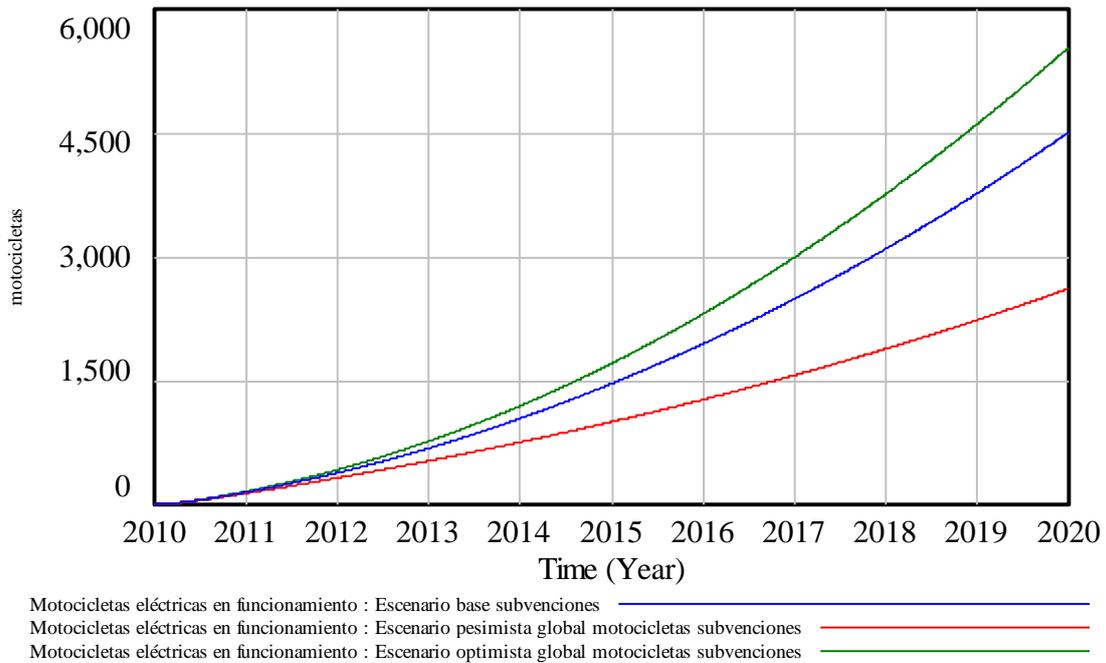
### Motocicletas eléctricas en funcionamiento



**Figura 264: Número de motocicletas eléctricas en los escenarios optimista y pesimista global eliminando la subvención a la compra.**

Se ve la enorme diferencia entre los tres escenarios, que aumenta aún más si se decide prolongar las subvenciones hasta el 2020.

### Motocicletas eléctricas en funcionamiento



**Figura 265: Número de motocicletas eléctricas en los escenarios optimista y pesimista global continuando la subvención a la compra.**

En el mejor de los casos manteniendo las subvenciones de 1.200 € se podrán lograr valores superiores a los 5.500 motocicletas eléctricas en funcionamiento en el año 2020.

En el caso de haberse mantenido las subvenciones para las motocicletas se podrían haber obtenido valores duplican o incluso triplican los que se van a poder obtener sin ellas.



## Capítulo 9

# Conclusiones

### 9.1 Conclusiones

En el año 2010, el sector del transporte consumió aproximadamente el 38% de la energía total empleada en España con una gran dependencia de los combustibles de origen petrolífero en los transportes de carretera. Si se tiene en cuenta que las economías modernas han evolucionado en torno al automóvil de combustión interna y el petróleo, la introducción con éxito y la difusión de vehículos de combustibles alternativos es más difícil y compleja que la de muchos otros productos.

La cuestión principal a resolver por esta tesis era el análisis de los factores que podían tener más influencia en el desarrollo del mercado de vehículos eléctricos en España con el objetivo final de ayudar en la toma de decisiones políticas y estratégicas relativas al vehículo eléctrico. En concreto se pretendía orientar en las políticas públicas, incluidas las presupuestarias, que pudieran ser más eficaces en la promoción del vehículo eléctrico como alternativa al vehículo de motor de combustión, y más concretamente para alcanzar algunas de las metas propuestas por el propio Gobierno. También se ha proporcionado en esta tesis el análisis sobre las teorías y prácticas asociadas con el proceso de adopción de los vehículos eléctricos.

Hay factores que influyen muy significativamente en el sector, tales como, las preferencias de los consumidores, las especificaciones técnicas, los programas de subvenciones, las normas de emisión, normas técnicas, normas de seguridad, etc. En la medida de lo posible se han intentado modelar todas estas influencias lo que implica una alta cantidad de complejidad en el modelo.

Dada la actual situación del mercado automovilístico, la respuesta a los problemas planteados no estará disponible hasta saber de antemano cómo, cuándo y dónde se van a producir los avances en este sector. El desarrollo futuro del sector de los vehículos eléctricos es todavía desconocido.

Los vehículos eléctricos tienen el potencial de revolucionar la industria del transporte. No obstante en la actualidad tienen numerosos obstáculos a su desarrollo como se ha visto en los capítulos anteriores.

De manera general, se puede decir que los vehículos eléctricos tienen tres grandes desventajas en relación con los vehículos convencionales: la falta de autonomía, el alto precio de adquisición y la falta de infraestructura de recarga. La autonomía que posee un vehículo eléctrico en relación con la de un vehículo convencional hoy en día es muy reducida, por lo que el mercado potencial para los vehículos eléctricos se limita enormemente a principalmente los usuarios de la ciudad (personas que viajan distancias cortas al día). Obviamente, el avance en las tecnologías de las baterías hará que los vehículos eléctricos sean más atractivos. Bajo la incertidumbre de este avance, la investigación es necesaria para lograr un mayor alcance de los vehículos eléctricos a precios moderados.

El alto costo que está vinculado a los vehículos eléctricos, seguirá siendo un problema hasta el año 2020 que es el horizonte temporal de la tesis. Diversos estudios citan el año 2030 como el año en que dichos costos comenzarán a disminuir, cuando los efectos del aprendizaje puedan haber reducido la penalización económica a un nivel que haga garantizar los periodos de amortización más cortos y aceptables. El alto costo de compra del vehículo eléctrico (principalmente por el precio de la batería) es una barrera importante para iniciar la difusión.

Por último, el tercer inconveniente del vehículo eléctrico es la falta de infraestructura de recarga. Si se compara el vehículo eléctrico con el convencional en cuanto a infraestructura se refiere, el resultado es abrumador. En la actualidad, la infraestructura de recarga del vehículo eléctrico no está preparada para una implantación masiva del vehículo eléctrico en la sociedad. El desarrollo de esta infraestructura de carga tendrá que seguir el ritmo de desarrollo del mercado para que los consumidores adquieran la confianza en la capacidad de recargar sus vehículos con el mínimo de inconvenientes.

El modelo de dinámica de sistemas y las simulaciones, proporcionan la estructura y los comportamientos con el fin de comprender el problema actual y previsional del vehículo eléctrico en España. Los factores clave para integrar las políticas con criterios de mercado y de consumidores se han mostrado y cuantificado. Las simulaciones ayudan a entender el problema y predecir la evolución de los vehículos eléctricos en España bajo diferentes hipótesis.

Como se ha descrito, a la vista de los resultados de los diferentes escenarios, para una buena implantación del vehículo eléctrico, según los objetivos marcados por el Gobierno, la alternativa política más directa consistiría en un gasto presupuestario público orientado a subvencionar la compra del mismo del vehículo eléctrico. La adquisición del vehículo eléctrico frente al convencional, tiene un sobre coste que no siempre es aceptado por el consumidor final (pese a que tener se va compensando durante la utilización del vehículo). No obstante, en ninguno de los escenarios analizados (ni siquiera en el escenario más optimista), se obtienen los resultados deseados si se paralizan las subvenciones al potencial comprador. De esto se deduce que el muy alto costo inicial para el vehículo eléctrico indica que se necesitan medidas políticas específicas a fin de superar esta barrera potencial. Estas políticas de reducción del precio de adquisición del vehículo eléctrico se han aplicado para disminuir la percepción de alta inversión que puede tener el cliente potencial. La reducción de costes de adquisición del vehículo eléctrico tiene un impacto significativo en el corto plazo para ayudar al inicio de la difusión del mismo.

De hecho, el factor económico es tan importante, que como se ha visto en los escenarios de evolución de la autonomía, el cliente potencial va a primar antes el

aspecto económico que la autonomía del vehículo. Según los resultados de las simulaciones, el cliente va a preferir un vehículo con una menor autonomía, pero que tenga un menor costo. Por esto, pese a que existan mejoras tecnológicas importantes, seguirá siendo necesaria una aportación económica extra a la hora de la adquisición del vehículo. Si se comparan los datos resultantes de los modelos desarrollados en 2010 y en 2013, como se dijo el principal factor diferenciador es el aspecto económico, pero sólo este factor hace que se alcancen los objetivos fijados por el Gobierno para el año 2020 o no.

En el estudio se ha considerado que los costos van a disminuir significativamente en los próximos años ya que los fabricantes se mueven prácticamente en la fase experimental de sus proyectos y su oferta al mercado. El aumento del volumen de fabricación conllevará también reducciones significativas de los costes de las baterías que también vendrán apoyados por el avance técnico de la curva de aprendizaje. Obviamente, los resultados obtenidos son con unos costos específicos iniciales para las baterías. Si estos son significativamente más altos que los que se utilizan en el presente estudio, esto podría extender el periodo de recuperación de la inversión para el vehículo eléctrico y por tanto, reducir la implantación del mismo.

Respecto al factor económico, el vehículo eléctrico va a poseer una ventaja muy significativa en relación con el vehículo convencional que va a ser el coste de utilización, donde el uso de la electricidad es más barato que el uso de combustibles derivados del petróleo. La diferencia en el precio de la electricidad, debido a los diferentes patrones inciertos de recarga del vehículo eléctrico, no van a tener un impacto significativo en la difusión del vehículo eléctrico, puesto que la alta diferencia en los costes de utilización de ambos tipos de vehículos permanecerá aún con precios elevados de la electricidad. Además, los consumidores comienzan a considerar más alternativas al vehículo convencional, una vez que los precios del petróleo aportan una gran incertidumbre debido a su volatilidad. Esto ha quedado corroborado con la gran sensibilidad que tiene el modelo a las fluctuaciones del precio del petróleo. En este caso se pueden aplicar políticas que aumenten aún más la diferencia de costes de utilización entre el vehículo eléctrico y el convencional con el fin de hacer que el vehículo eléctrico sea una opción más atractiva.

Otro de los aspectos analizados corresponde con las infraestructuras de recarga del vehículo eléctrico. Un obstáculo importante en la implantación de los vehículos eléctricos es la posibilidad de hacer viajes largos y continuos similares a los vehículos con motores de combustión interna. Se ha podido observar claramente en el escenario de variación de estaciones de intercambio de baterías, que el apoyo a este tipo de infraestructuras es muy rentable económicamente, puesto que con una inversión relativamente pequeña, se consigue aumentar la demanda del vehículo eléctrico de manera muy importante, y se ahorra mucho dinero en subvenciones. Es decir, a medida que aumenta la inversión en estaciones de intercambio de baterías, que no tiene por qué ser realizada por el Gobierno sino por una sociedad privada, desciende de manera muy elevada la inversión en subvenciones a la compra necesaria. Además de esta gran ventaja económica, también va a tener otra importante como va a ser la de la generación de empleo. Una red cuidadosamente planificada de estaciones de intercambio de baterías es una solución prometedora que puede permitir a los vehículos eléctricos expandirse en el mercado al reducir este tipo de molestias que pueden existir en la actualidad.

Obviamente, tal y como se explicó en su correspondiente capítulo, las estaciones de intercambio de baterías poseen una barrera muy importante para su desarrollo. Esta barrera es la falta de estandarización de los modelos eléctricos de los diferentes fabricantes que implican diferentes configuraciones del bajo piso de los vehículos, y por tanto diferentes ubicaciones del motor, batería, etc. Para su correcto desarrollo y evolución es necesaria una regulación y una estandarización lo que requerirá la cooperación entre los fabricantes de los vehículos eléctricos y los fabricantes de las baterías.

A nivel medioambiental, los vehículos eléctricos tienen el potencial de ofrecer una reducción significativa de emisiones de CO<sub>2</sub> en el transporte por carretera, en comparación con los vehículos de combustión interna a medio y largo plazo como se vio anteriormente. La magnitud de la reducción de emisiones lograda dependerá del número de vehículos eléctricos que se utilicen y la fuente de la que se obtiene la electricidad que el vehículo eléctrico consume. Este último dato es muy importante puesto que, como se definió en el capítulo de medio ambiente, el mismo vehículo eléctrico circulando por las carreteras españolas generaba unas emisiones de CO<sub>2</sub> en su

ciclo *Well-To-Wheel* de casi la mitad que ese mismo vehículo eléctrico en las carreteras alemanas, debido al mix de generación eléctrica de cada país como se ha visto en los escenarios con diferentes mix eléctricos.

Como se vio en las simulaciones de los escenarios, en el mejor de los casos según los resultados obtenidos se obtendría una reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> de casi 8 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>, lo que en ningún caso obtiene un beneficio económico al valor estudiado de las tasas de CO<sub>2</sub> con el desembolso necesario para lograr esas reducciones. Como es lógico, la fluctuación del precio de dichas tasas puede hacer variar la conclusión aunque según lo estudiado, el valor de la tasa debería ser muy superior al actual para que fuera rentable económicamente la inversión del Gobierno.

No obstante, pese a la dudosa rentabilidad económica, un primer análisis en términos rentabilidad medioambiental basados en emisiones de CO<sub>2</sub> es favorable al vehículo eléctrico. Sin embargo sería necesario un análisis riguroso del impacto medioambiental de cada tipo de vehículo incluyendo el proceso completo de fabricación, y la extracción de los materiales empleados, lo que esta fuera del alcance de esta tesis. Así mismo no hay que olvidar las mejoras que se están produciendo en el vehículo convencional y en el diseño de motores y combustibles alternativos, como los biocombustibles pueden jugar un papel importante en el futuro, y siempre teniendo en cuenta la importancia del mix energético de donde se obtenga la electricidad para la carga del vehículo eléctrico como se ha indicado anteriormente.

Por último, se ha considerado interesante resaltar el aspecto psicológico del vehículo eléctrico. Al intentar adaptar una nueva tecnología a los consumidores actuales, existen ciertas incertidumbres que deben ser solventadas. Habrá algunas que no se podrán solucionar de manera simple, puesto que hay un número de consumidores importantes que para sólo pensarse en adquirir un vehículo eléctrico, van a tener que ver circulando por las calles un número importante de este tipo de vehículo. Pero hay otro tipo de incertidumbres que existen y que se pueden solucionar de una manera relativamente sencilla. En este caso, sí que es necesaria una cierta inversión en divulgar las ventajas del vehículo eléctrico y sus facilidades, puesto que existe un gran desconocimiento. De esta manera, se va a conseguir demostrar al cliente potencial la facilidad de la implantación de un punto de recarga en el garaje, o que la autonomía

actual del vehículo eléctrico es suficiente para su uso cotidiano. Con esto se generará una mayor confianza, que al final redundará en una mayor demanda.

Como resumen final, si el Gobierno español mantiene sus objetivos para los vehículos eléctricos y no existe un salto tecnológico inesperado, serán necesarias nuevas políticas económicas o financieras, así como otro tipo de incentivos para apoyar la implantación del mercado de vehículos eléctricos en España. A pesar de que los resultados cuantitativos sobre posibles subvenciones e implantación del vehículo eléctrico son sólo valores orientativos y están condicionados por la hipótesis planteada y los escenarios analizados, parece muy poco probable que se alcancen los objetivos fijados por el Gobierno para el año 2020, ni siquiera manteniendo las subvenciones en la adquisición del vehículo eléctrico.

La introducción con éxito en el mercado de los vehículos eléctricos no es simplemente una evolución del mercado de los vehículos existentes, sino una transformación del mismo. Es necesaria la creación de diferentes incentivos para superar las barreras identificadas. El éxito del despliegue de los vehículos eléctricos requerirá que un gran número de partes interesadas trabajen de manera conjunta, como son los responsables políticos, los fabricantes de automóviles, los proveedores de energía, etc. Es importante que todas las partes interesadas comprendan los problemas asociados a estos vehículos para que puedan ser tratados de una manera coherente. Sin esto, existe el peligro de que las cuestiones importantes puedan ser pasadas por alto, como por ejemplo las normas para la carga.

Un ejemplo de referencia en política pública de apoyo al vehículo eléctrico puede ser Noruega que posee más de 7.000 vehículos eléctricos circulando por sus carreteras y cuenta con más de 3.200 puntos de recarga gratuitos a lo largo del país para una población cercana a los 5.000.000 de habitantes. Esto lo ha logrado mediante una batería de incentivos a la compra de vehículos impulsados por electricidad, exención del IVA, aparcamientos gratuitos, etc. Y a pesar de tener un buen dato de penetración del vehículo eléctrico en el país, van a mantener los incentivos a la adquisición hasta el año 2018.

Por otro lado, las políticas públicas sobre el vehículo eléctrico deben contextualizarse en una política de movilidad más amplia que considere todas las

alternativas posibles para el desplazamiento de personas y mercancías, así como las prioridades en la política presupuestaria en una situación en la que los recursos económicos públicos han disminuido de forma muy significativa y han afectado de forma importante al gasto público en la mayoría de los sectores.

## 9.2 Futuras líneas de investigación

Como futuras líneas de trabajo se podrían incluir las siguientes para enriquecer el modelo:

- Diferentes tipos de baterías: Como batería base para el estudio se ha utilizado la de iones de litio, pero hay varias baterías en desarrollo que pueden desbancar a esta en un futuro.
- Influencia del PHEV: En esta tesis sólo se ha trabajado con el vehículo eléctrico de batería, pero será muy interesante el poder analizar cómo va a evolucionar el mercado con la inclusión del PHEV.
- Estudio de las flotas de vehículos: Creación de un modelo que abarque las flotas de vehículos.
- Implementación en el modelo general de la tecnología V2G (*vehicle-to-grid*).

## Capítulo 10

# Referencias bibliográficas

- [Aaa12] The American Automobile Association, Inc. Association Communication (AAA). (2012). *Your driving costs*.
- [Acem13] Association des Constructeurs Européens de Motocycles (ACEM) (2013). *The Motorcycle Industry in Europe Statistical overview. Registrations and deliveries Circulating park Production. Top 10 models*.
- [Ahman01] Ahman, M. (2001). *Primary energy efficiency of alternative power trains in vehicles*. Energy 26 (2001), 973-989.
- [Ahman04] Ahman, M. (2004). *Government policy and the development of electric vehicles in Japan*. Energy Policy 34 (2006), 433–443.
- [Alonso09] Alonso González, J. A. (2009). Necesidades técnico-económicas para el desarrollo de un mercado ibérico sostenible en 2020. *Desarrollo del coche eléctrico y las electrotecnologías y sus efectos técnicos y económicos en la gestión de la red*.

- [Anable12] Anable, J. et al (2012). *Modelling transport energy demand: A socio-technical approach*. Energy Policy 41 (2012), 125-138.
- [Anderman00] Anderman M., Kalhammer F., MacArthur, D. (2000). *Advanced Batteries for Electric Vehicles: An Assessment of Performance, Cost, and Availability*. California Air Resources Board (CARB).
- [Anderman07] Anderman, M. Advanced Automotive batteries (2007). *Status and Prospects of Battery Technology for Hybrid Electric Vehicles, Including Plug-in Hybrid Electric Vehicles*.
- [Andersen09] Andersen, Poul H., Mathews, John A., Rask, Morten. (2009). *Integrating private transport into renewable energy policy: The strategy of creating intelligent recharging grids for electric vehicles*. Energy Policy 37 (2009), 2481–2486.
- [Anesdor07] Asociación Nacional Empresas Sector Dos Ruedas. ANESDOR. (2007) *Informe del sector de las dos ruedas en España. 2007*.
- [Anfac06] Asociación española de fabricantes de automóviles y camiones (ANFAC) (2006). *Reduciendo las emisiones de CO<sub>2</sub> de los vehículos*.
- [Anfac12] Asociación española de fabricantes de automóviles y camiones (ANFAC) (2012). *Memorial anual 2011*.
- [Aracil95] Aracil, Javier (1995). *Dinámica de sistemas*. Ed. Isdefe, Madrid.
- [Aracil97] Aracil, J., Gordillo, F. (1997). *Dinámica de sistemas*. Alianza Editorial.
- [Armenia10] Armenia, S., Baldoni, F., Falsini, D., Taibi, E. (2010). *A System Dynamics Energy Model for a Sustainable Transportation System*.
- [Armstrong13] Armstrong, M., El Hajj Moussa, C., Adnot, J., Galli, A., Riviere, P. (2013). *Optimal recharging strategy for battery-switch stations for electric vehicles in France*. Energy Policy 60 (2013), 569–582.

- [Atienza08] Atienza Serna, Luis (Red Eléctrica de España) (2008). *Aprovisionamiento de energías primarias y redes de transporte*. Consejo económico y social. Madrid, 2008
- [Axsen10] Axsen, J., Kurani, K. S., Burke, Andrew. (2010). *Are batteries ready for plug-in hybrid buyers?* Transport Policy 17 (2010), 173-182.
- [Bandivadekar08] Bandivadekar, A., Bodek, K., Cheah, L., Evans, C., Groode, T., Heywood, J., Kasseris, E., Kromer, M., Weiss, M. (2008). *On the Road in 2035: Reducing Transportation's Petroleum Consumption and GHG Emissions*. Laboratory for Energy and the Environment (Massachusetts Institute of Technology).
- [Baptista09] Baptista, P., Silva, C., Gonçalves, G., Farias, T. (2009). *Full life cycle analysis of market penetration of electricity based vehicles*. Electric Vehicle Symposium 24 (EVS 24), Stavanger, Noruega, 13-16 Mayo, 2009.
- [Bargallo09] Bargalló, R., Llaverías, J., Martín, H. (2009). *El vehículo eléctrico y la eficiencia energética global*. Universidad Politécnica de Cataluña.
- [Barreto04] Barreto, L., Klaassen, G. (2004). *Emission trading and the role of learning-by-doing: Spillovers in the "bottom-up" energy system ERIS Model*. International Journal of Energy Technology and Policy, 2004 Vol.2, No.1/2, pp.70 – 95.
- [Berr08] Department for the Business Enterprise and Regulative Reform (BERR) and Department for Transport (DfT) (2008). *Investigation into the Scope for the Transport Sector to Switch to Electric Vehicles and Plug-In Hybrid Vehicles*.
- [Better] Better Place. Disponible en internet en: <http://www.betterplace.com/>
- [Blesl09] Blesl, M., Bruchof, D., Hartmann, N., Özdemir, D., Fahl, U., Eltrop, L., Voß, A. (2009) *Entwicklungsstand und Perspektiven der Elektro-*

*mobilität*. Universität Stuttgart Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung

- [Bp10] BP (2010). *Statistical Review of World Energy 2010*.
- [Bp12] BP (2012). *Statistical Review of World Energy 2012*.
- [Bongard11] Bongard, Tim. (2011). *A System dynamics model for the adoption process of electric vehicles from a consumer perspective*. Eindhoven University of Technology.
- [Borenstein08] Borenstein, S. (2008). *Cost, Conflict and Climate: US Challenges in the World Oil Market*. Center for the Study of Energy Markets Working Paper # 177, University of California Energy Institute.
- [Boston10] The Boston Consulting Group (2010). *Batteries for electric cars. Challenges, opportunities and the outlook to 2020*.
- [Botsford09] Botsford, C., Szczepanek, A. (2009). *Fast Charging vs. Slow Charging: Pros and cons for the New Age of Electric Vehicles*. Electric Vehicle Symposium 24 (EVS 24), Stavanger, Noruega, 13-16 Mayo, 2009.
- [Bickert11] Bickert, S., Kuckshinrichs, W. (2011). *Electromobility as a Technical Concept in an Ecological Mobility Sector? An Analysis of Costs*. 9th International Conference of the European Society for Ecological Economics (ESEE 2011), Estambul, Turquía, 14–17 Junio 2011.
- [Brown10] Brown, S., Pyke, D., Steenhof, P. (2010). *Electric vehicles: The role and importance of standards in an emerging market*. Energy Policy 38 (2010), 3797-3806.
- [Brownstone99] Brownstone, D., Train K. (1999). *Forecasting new product penetration with flexible substitution patterns*. Journal of Econometrics 89 (1999), 109–129.
- [Bullis06] Bullis, K. (2006). *Higher-Capacity Lithium-Ion Batteries*. The Technology Review, June 2006.

- [Campanari09] Campanari S., Manzolini G., de la Iglesia, F.G. (2009). *Energy analysis of electric vehicles using batteries or fuel cells through well-to-wheel driving cycle simulations*. Journal of Power Sources 186 (2009), 464-477.
- [Castro07] De Castro, C., De Miguel, L. J. (2007). *Modelo de simulación con realimentaciones entre el sistema energético, el cambio climático y la sociedad*. I Congreso nacional sobre Cambio Global. Abril 2007. Universidad Carlos III. Madrid
- [Castro09a] De Castro Carranza, Carlos (2009). *Escenarios de energía-economía mundiales con modelos de dinámica de sistemas*. Universidad de Valladolid.
- [Castro09b] De Castro, C., Miguel L. J., Mediavilla, M. (2009). *The role of non conventional oil in the attenuation of peak oil*. Energy Policy 37 (2009), 1825–1833.
- [Chiang06] Chiang, Y. (2006). *High Performance Batteries to Transform Transportation*. Technology Review's Emerging Technology Conference, 9/28/2006.
- [Christensen12] Christensen, T. B., Wells, P., Cipcigan, L. (2012). *Can innovative business models overcome resistance to electric vehicles? Better Place and battery electric cars in Denmark*. Energy Policy 48 (2012), 498–505.
- [Cuenca99] Cuenca R. M., Gaines, L. L., Vyas, A. D. (1999). *Evaluation of Electric Vehicle Production and Operating Costs*. Center for Transportation Research, Energy Systems Division, Argonne National Laboratory (ANL).
- [Cee09] Club Español de la Energía. Instituto Español de la Energía (2009). *Cuadernos de Energía, n° 26*, octubre de 2009.

- [DeLuchi89] DeLuchi, M., Wang, Q., Sperling, D. (1989). Electric vehicles: Performance, life-cycle costs, emissions, and recharging requirement. *Transportation Research Part A: General* 23 (1989), 255-278.
- [Deutsche08] Deutsche Bank Securities Inc. (2008). *Electric Cars: Plugged In*.
- [Deutsche10] Deutsche Bank Securities Inc. (2010). *The End of the Oil Age. 2011 and beyond: a reality check*.
- [Dgt11] Dirección General de Tráfico (DGT). *Anuario estadístico general. Año 2011*.
- [Diamond09] Diamond, David (2009). *The impact of government incentives for hybrid-electric vehicles: Evidence from US states*. *Energy Policy* 37 (2009), 972 – 983.
- [Diez07] Díez Robles, Rafael (2007). *Aplicación de la dinámica de sistemas para estudiar el posible conflicto entre biofuel y comestibles*. Universidad de Valladolid.
- [Dixon02] Dixon, L., Porche, I., Kulick, J. (2002). *Driving Emissions to Zero. Are the Benefits of California's Zero Emission Vehicle Program Worth the Costs?*. Ed. RAND, Pittsburgh.
- [Duvall04] Duvall, M., Browning, L., Kalhammer, F., Warf, W., Taylor, D., Wehrey, M., Pinsky, N. (2004). *Advanced Batteries for Electric-Drive Vehicles: A Technology and Cost-Effectiveness Assessment for Battery Electric Vehicles, Power Assist Hybrid Electric Vehicles, and Plug-in Hybrid Electric Vehicles*. Electric Power Research Institute (EPRI).
- [Duvall05] Duvall, M., Alexander, M. (2005). *Batteries for Electric Drive Vehicles – Status 2005*. Electric Power Research Institute (EPRI).
- [Edwards08] Edwards, P. P., Kuznetsov, V. L., David, W. I. F., Brandon, N. P. (2008). *Hydrogen and fuel cells: Towards a sustainable energy future*. *Energy Policy* 36 (2008), 4356 – 4362.

- [Eea12] European Environment Agency (2012). *Monitoring CO<sub>2</sub> emissions from new passenger cars in the EU: summary of data for 2011*.
- [Electrification09] Electrification Coalition (2009). *Electrification Roadmap. Revolutionizing transportation and achieving energy security*.
- [Electrification10a] Electrification Coalition (2010). *Economic Impact of the Electrification Roadmap*.
- [Electrification10b] Electrification Coalition (2010). *Fleet electrification roadmap*
- [Efte09] European Federation for Transport and Environment AISBL (EFTE) (2009). *How to avoid an electric shock. Electric cars: from hype to reality*.
- [Eskebaek09] Eskebæk, Lars (2009). *Electric vehicles on the Danish market in 2020 and the economic value of the company Better Place*. Copenhagen Business School.
- [Eucar06] European Council for Automotive R&D (EUCAR). European Commission Joint Research Centre. Concawe (2006). *Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. Well-To-Tank Report version 2b (2006)*.
- [Eucar07] European Council for Automotive R&D (EUCAR). European Commission Joint Research Centre. Concawe (2007). *Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. Overview of Results*.
- [Eucar08a] European Council for Automotive R&D (EUCAR). European Commission Joint Research Centre. Concawe (2008). *Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. Description and detailed energy and GHG balance of individual pathways. Well-To-Tank Report version 3.0 (2008)*.

- [Eucar08b] European Council for Automotive R&D (EUCAR). European Commission Joint Research Centre. Concawe (2008). *Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. TANK-to-WHEELS Report. version 3.0 (2008)*.
- [Eurobat05] European Storage Battery Manufacturers (EUROBAT) (2005). *Battery systems for Electric Energy Storage Issues*. Battery Industry RTD Position Paper.
- [European10a] European Commission. Directorate-General for Energy (2010). *European energy and transport, Trends to 2030 - Update 2009*.
- [European10b] European Commission. Directorate-General for Energy. Market Observatory for Energy (2010). *Prix á la consommation des produits pétroliers droits et taxes compris*.
- [European10c] European Commission. Directorate-General for Energy. Market Observatory for Energy (2010). *Prix á la consommation des produits pétroliers hors droits et taxes*.
- [European11a] European Commission. (2011). *Communication from the Commission to the European Parliament, The Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of Regions, A Roadmap for Moving to a Competitive Low Carbon Economy in 2050*. Bruselas, 2011.
- [European11b] European Commission (2011). *Future Transports Fuels: Report of the European Expert Group on Future Transports Fuels*.
- [European12] European Commission. Directorate-General for Energy. Market Observatory for Energy (2012). *Duties and taxes*.
- [Ewi10] EWI, GWS & PROGNOSES (2010). *Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung*.
- [Faconauto] Federación de Asociaciones de Concesionarios de la Automoción (FACONAUTO). Disponible en internet en: <http://www.faconauto.com>

- [Federal03] Federal Environmental Agency (2003). *Reducing CO<sub>2</sub> emissions in the transport sector*.
- [Fiddaman02] Fiddaman, T. S. (2002). *Exploring Policy Options with a Behavioral Climate-Economy Model*. System Dynamics Review, Vol. 18, No. 2, 243-268
- [Ford99] Ford, Andrew (1999). *Modeling the environment: An introduction to system dynamics models of environmental systems*. Ed. Island Press, Washington.
- [Foro07] Foro Nuclear. Foro de la Industria Nuclear Española (2007). *Mix de generación en el sistema eléctrico español en el horizonte 2030*.
- [Forrester61] Forrester, Jay Wright (1961). *Industrial Dynamics*. The MIT Press.
- [Forrester74] Forrester, Jay Wright (1974). *World Dynamics*. Productivity Press
- [Frost10] Frost & Sullivan (2010). *Electric Vehicles: Assessment of New Business Models and Value Chains*.
- [Gaines00] Gaines, L., Cuenca R. (2000). *Costs of Lithium-Ion Batteries for Vehicles*. Center for Transportation Research, Energy Systems Division, Argonne National Laboratory (ANL).
- [García12] García, I., Miguel, L. J. (2012). *Is the electric vehicle an attractive option for customers?*. Energies 2012, 5(1), 71-91.
- [García-Valdecasas08] García-Valdecasas, E. (2008). *Estudio de la implantación de una motocicleta eléctrica como vehículo para agentes de movilidad urbana*. Universidad Pontificia de Comillas.
- [Gas10] Seminario de Gestión Ambiental: El Coche Eléctrico (2010). Organizado por Fundación Gas Natural.

- [Geels04] Geels, F. W. (2004). *From sectoral systems of innovation to socio-technical systems Insights about dynamics and change from sociology and institutional theory*. Research Policy 33 (2004), 897–920.
- [Giz11] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (2011). *International Fuel Prices 2010/2011*.
- [Graham01] Graham, R., et al. (2001). *Comparing the Benefits and Impacts of Hybrid Electric Vehicle Options*. Electric Power Research Institute (EPRI).
- [Gómez12] Gómez, T., Momber, I., Rivier, M., Sánchez, A., (2011). *Regulatory framework and business models for charging plug-in electric vehicles: Infrastructure, agents, and commercial relationships*. Energy Policy 39 (2011), 6360–6375.
- [Granovskii06] Granovskii, M., Dincer, I., Rosen, M. A. (2006). *Economic and environmental comparison of conventional, hybrid, electric and hydrogen fuel cell vehicles*. Journal of Power Sources 159 (2009), 1186-1193.
- [Greening00] Greening, L. A., Greene, D. L., Difiglio, C. (2000). *Energy efficiency and consumption—The rebound effect—A survey*. Energy Policy 28 (2000), 389–401.
- [Guenther10] Guenther C., Schott B., Jossen A., Lissen J. (2010). *Grid integration of Electrical Power Train Systems in Existing and Future Energy Supply Structures - Development of a Battery Model Considering Aging and Costs* -. NET-ELAN. Ministerio Federal de Economía y Tecnología de Alemania.
- [Guttowski03] Guttowski, S., Weber, S., Hoene, E., John, W., Reichl, H. (2003). *EMC Issues in Cars with Electric Drives*. Fraunhofer Institute for Reliability and Microintegration.
- [Hauser06] Hauser, J., Tellis, G. J., Abbie, G. (2006). *Research on Innovation: A Review and Agenda*. Marketing Science 25 (2006), 687–717.

- [Hazeldine09] Hazeldine, T., Kollamthodi, S., Brannigan, C., Morris, M., Deller, L. (2009). *Market outlook to 2022 for battery electric vehicles and plug-in hybrid electric vehicles*. AEA group.
- [Helland09] Helland, Åsgeir (2009). *Are global CO<sub>2</sub> emission reductions possible by driving electric?*. Electric Vehicle Symposium 24 (EVS 24), Stavanger, Noruega, 13-16 Mayo, 2009.
- [Hensley09] Hensley, R., Knupfer, S., Pinner, D. McKinsey Quarterly, nº3 (2009). *Electrifying Cars: How Three Industries Will Evolve*. 2009.
- [Himmelweit01] Himmelweit, S., Simonetti, R., Trigg, A. (2001). *Microeconomics: Neoclassical and Institutional Perspectives on Economic Behaviour*. Ed. Cengage Learning EMEA.
- [Hirschey09] Hirschey, Mark (2009). *What's Your Strategy for the Electric Vehicle Market?*. Oliver Wyman Group.
- [Huang08] Huang, B. N. et al. (2008). *Causal relationship between energy consumption and GDP growth revisited: A dynamic panel data approach*. Ecological Economics 67 (2008), 41–54.
- [Hubbert56] Hubbert, M. K. (1956). *Nuclear energy and the fossil fuels. Drilling and Production Practice*. American Petroleum Institute. Spring Meeting (Texas) of the American Petroleum Institute.
- [Ice12] Intercontinental Exchange Inc. (2012). *ICE Futures Europe Monthly Utility Markets Report – October 2012*.
- [Idae09a] IDAE (2009). *Proyecto Movele. Proyecto piloto de demostración de viabilidad del vehículo eléctrico*. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Gobierno de España.
- [Idae09b] IDAE (2009). *Proyecto Piloto de MOVilidad ELÉctrica. Movele*. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Gobierno de España.

- [Idae10] IDAE (2010). *Plan de acción nacional de energías renovables de España (PANER) 2011 - 2020*. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Gobierno de España.
- [Iea11] International Energy Agency (IEA) (2011). *World Energy Outlook 2011*.
- [Iea13] International Energy Agency (IEA) (2013). *Key World Energy Statistics 2012*.
- [Industria10a] Ministerio de Industria, Comercio y Turismo (2010). *El mix energético en 2020*. Gobierno de España.
- [Industria10b] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio (2010). *Estrategia integral para el impulso del vehículo eléctrico en España*. Gobierno de España.
- [Industria11] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Secretaría de Estado de Energía. (2011). *La energía en España 2010*. Gobierno de España.
- [Ing11] ING Economisch Bureau (2011). *Invloed elektrische auto op autobranche tot 2020 beperkt. Wel kansen voor specialisten*.
- [Instituto11] Instituto de Estudios de Automoción S. L. (2011). *BAINVEL. Barómetro para la introducción del vehículo eléctrico en España*.
- [Ion09] Ion, L., Cucu, T., Boussier, J.M., Teng, F., Breuil, D. (2009). *Site selection for electric cars of a car-sharing service*. Electric Vehicle Symposium 24 (EVS 24), Stavanger, Noruega, 13-16 Mayo, 2009.
- [Ipts05] Institute for Prospective Technological Studies (IPTS) (2005). *Hybrids for road transport. Status and prospects of hybrid technology and the regeneration of energy in road vehicles*. Technical Report EUR 21743 EN. European Commission Joint Research Centre.
- [Jama12] Japan Automobile Manufacturers Association (JAMA). *The Motor Industry of Japan 2012*.

- [Järvinen12] Järvinen, J., Orton, F., Nelson, T. (2012). *Electric Vehicles in Australia's National Electricity Market: Energy Market and Policy Implications*. The Electricity Journal 25 (2012), 63-87.
- [Johansson09] Johansson, B. (2009). *Will restrictions on CO2 emissions require reductions in transport demand?*. Energy Policy 37 (2009), 3212-3220.
- [Khan09] Khan, M., Kar, N. C. (2009). *Hybrid Electric Vehicles for Sustainable Transportation: A Canadian Perspective*. Electric Vehicle Symposium 24 (EVS 24), Stavanger, Noruega, 13-16 Mayo, 2009.
- [Kahouli08] Kahouli-Brahmi, S. (2008). *Technological learning in energy-environment-economy modelling: A survey*. Energy Policy 36 (2008), 138-162.
- [Kalhammer07] Kalhammer et. al. (2007). *Status and Prospects for Zero Emissions Vehicle Technology*. California Air Resources Board (CARB).
- [Kaschub12] Kaschub, T., Paetz, A., Jochem, P., Fichtner, W. (2012). *Feasibility of Battery Switch Stations for Local Emission Free Public Transport*. 7th Conference on Energy Economics and Technology. Dresden, Alemania, 27 Abril, 2012.
- [Kendall08] Kendall, Gary (2008). *Plug in. The end of the oil age*. WWF.
- [Kloess09] Kloess, M., Weichbold, A., Könighofer, K. (2009). *Technical, Ecological and Economic Assessment of Electrified Powertrain Systems for Passenger Cars in a Dynamic Context (2010 to 2050)*. Electric Vehicle Symposium 24 (EVS 24), Stavanger, Noruega, 13-16 Mayo, 2009.
- [Köhler06] Köhler, J., Grubb, M., Popp, D., Edenhofer, O. (2006). *The transition to endogenous technical change in climate-economy models: a technical overview to the innovation modelling comparison project*. The Energy Journal, Endogenous Technological Change, 17-55.

- [Kpgm12] KPGM International (2012). *KPGM's Global Automotive Executive Survey 2012*.
- [Kpgm13] KPGM International (2013). *KPGM's Global Automotive Executive Survey 2013*.
- [Kromer07] Kromer, M. A., Heywood, J. B. (2007). *Electric Powertrains: Opportunities and Challenges in the U.S. Light-Duty Vehicle Fleet*. Laboratory for Energy and the Environment (Massachusetts Institute of Technology).
- [Kurani08] Kurani, K., Axsen, J., Burke, A. (2008). *Batteries for Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs): Goals and the State of Technology circa 2008*. Institute of Transportation Studies. University of California.
- [Kurani09] Kurani, K., Axsen, J., Caperello, N., Davies, J., Stillwater, T. (2009). *Plug-In Hybrid Electric Vehicle (PHEV) Demonstration and Consumer Education Outread, and Market Research Program*. Institute of Transportation Studies, University of California.
- [Labriet10] Labriet, M., Cabal, H., Lechón, Y., Giannakidis, G., Kanudia, A. (2010). *The implementation of the EU renewable directive in Spain. Strategies and challenges*. Energy Policy 38 (2010), 2272–2281.
- [Laboratorio09] Laboratorio de Alternativas (2009). *El vehículo eléctrico: desafíos y oportunidades*. Cuaderno Seminario y Jornadas 61/2010.
- [Lemev] Catálogo comercial LEMev. Disponible en internet en: <http://www.lemev.com/>.
- [Lim09] Lim, K.C., Saidi, Y., Mennitt, T., Alastair, J. Valence Technology Inc. (2009). *Meeting Electrical Vehicles Battery Demands*.
- [Lopez09] López J. M., Gómez, A., Aparicio, F., Sánchez, F. J. (2009). *Comparison of GHG emissions from diesel, biodiesel and natural gas refuse trucks of the City of Madrid*. Applied Energy 86 (2009), 610-615.

- [Lumbreras08] Lumbreras, J., Valdés, M., Borge, R., Rodríguez, M. E. (2008). *Assessment of vehicle emissions projections in Madrid (Spain) from 2004 to 2012 considering several control strategies*. Transportation Research Part A 42 (2008), 646–658.
- [Manzano11] Manzano, J. G. (2011). *Mercado de la motocicleta de combustión interna y oportunidades de la industria de la motocicleta eléctrica*. Universidad Carlos III de Madrid.
- [Martín03] Martín García, Juan (2003). *Teoría y ejercicios prácticos de Dinámica de Sistemas*. Ed. Juan Martín García, Barcelona.
- [Martinez86a] Martinez, S., Requena, A. (1986). *DINÁMICA DE SISTEMAS. 1. Simulación por ordenador*. Alianza Editorial.
- [Martinez86b] Martinez, S., Requena, A. (1986). *DINÁMICA DE SISTEMAS. 2. Modelos*. Alianza Editorial.
- [Mayor10] Mayor's Office of Long-Term Planning and Sustainability of New York (2010). PlaNYC. *Exploring electric vehicle adoption in New York city*.
- [McKinsey09] McKinsey & Company (2009). *Roads towards a low-carbon future: Reducing CO<sub>2</sub> emissions from passengers vehicles in the global road transportation system*.
- [McPherson11] McPherson, C., Richardson, J., McLennan, O., Zippel, G. (2011). *Planning an Electric Vehicle Battery-Switch Network for Australia*. Australasian Transport Research Forum 2011. Adelaide, Australia. 28 – 30 Septiembre, 2011.
- [Mecrow08] Mecrow, B. C., Jack, A. G. (2008). *Efficiency trends in electric machines and drives*. Energy Policy 36 (2008), 4336 – 4341.
- [Meadows72] Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., Behrens III, W. W. (1972). *The Limits to Growth: A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*. Universe Books.

- [Mediavilla11] Mediavilla, M., de Castro, C., Miguel L. J. (2011). *Analysis of the energetic transition: the electric car*. 9th International Conference of the European Society for Ecological Economics (ESEE 2011), Estambul, Turquía, 14–17 Junio 2011.
- [Mediavilla13] Mediavilla, M., de Castro, C., Capellán, I., Miguel L. J., Arto, I, Frechoso, F. (2013). *The transition towards renewable energies: Physical limits and temporal conditions*. *Energy Policy* 52 (2013), 297–311.
- [Mendiluce11] Mendiluce, M., Schipper, L. (2011). *Trends in passenger transport and freight energy use in Spain*. *Energy Policy* 39 (2011), 6466–6475.
- [Metcalf01] Metcalf, S. S. (2001). *A System Dynamics Exploration of Future Automotive Propulsion Regimes*. Massachusetts Institute of Technology
- [Miller05] Miller, J. M. (2005). *Comparative Assessment of Hybrid Vehicle Power Split Transmissions*. 4'th VI Winter Workshop Series.
- [Medio10] Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino. Secretaría de estado de cambio climático. Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental. Unidad de información ambiental estratégica (2010). *Inventario de gases de efecto invernadero en España. Edición 2010 (serie 1990 - 2008)*.
- [Mityc] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España. Disponible en internet en: <http://www.mityc.es/>
- [Mock09] Mock, P., Hülsebusch, D., Ungethüm, J., Schmid, S. A. (2009). *Electric vehicles – A model based assessment of future market prospects and environmental impacts*. Electric Vehicle Symposium 24 (EVS 24), Stavanger, Noruega, 13-16 Mayo, 2009.
- [Moore91] Moore, Geoffrey A. (1991). *Crossing the Chasm*. Ed. Harper Business Essentials.

- [Morales10] Morales-España, G. A. (2010). *Electric Vehicle Diffusion. Exploring Uncertainties using System Dynamics*. Delft University of Technology
- [Movele] Proyecto MOVELE. Disponible en internet en: <http://www.movele.es/>
- [Movilla09] Movilla, Santiago (2009). *Photovoltaic energy market in Spain: A System Dynamics Approach for Policy Development*. University of Bergen.
- [Movilla13] Movilla, S., Miguel L. J., Blázquez, L. F. (2013). *A system dynamics approach for the photovoltaic energy market in Spain*. *Energy Policy* 60 (2013), 142–154.
- [Mulally12] Conferencia de A. Mulally (CEO de Ford). Fortune's Brainstorm Green conference. Laguna Niguel, California, EE.UU. 16-18 Abril, 2012.
- [Neenan10] Neenan, B., et al. (2010). *Characterizing Consumers' Interest in and Infrastructure Expectations for Electric Vehicles: Research Design and Survey Results*. Electric Power Research Institute (EPRI).
- [Nu98] Naciones Unidas (1998). *Protocolo de Kyoto de la Convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático*.
- [Offer10] Offer, G. J., Howey, D., Contestabile, M., Clague, R., Brandon, N. P. (2010). *Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system*. *Energy Policy* 38 (2010), 24-29.
- [O'Keefe10] O'Keefe, M., Brooker, A., Johnson, C., Mendelsohn, M., Neubauer, J., Pesaran, A. (2010). *Battery Ownership Model: A Tool for Evaluating the Economics of Electrified Vehicles and Related Infrastructure*. National Renewable Energy Laboratory (NREL). 25th International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exposition. Shenzhen, China, 5–9 Noviembre, 2010.
- [Oliver09] Oliver Wyman (2009). *E-Mobility 2025. Power play with electric cars*. Oliver Wyman Group.

- [Peças09] Peças Lopes, J. A., Soares, F. J., Almeida, P. M., Moreira da Silva, M. (2009). *Smart Charging Strategies for Electric Vehicles: Enhancing Grid Performance and Maximizing the Use of Variable Renewable Energy Resources*. Electric Vehicle Symposium 24 (EVS 24), Stavanger, Noruega, 13-16 Mayo, 2009.
- [Perez05] Pérez Pérez, José Miguel (2005). *Análisis de la evolución global de los recursos energéticos de origen fósil*. Universidad de Valladolid.
- [Perujo09] Perujo, A., Ciuffo, B. (2009). *Potential Impact of Electric Vehicles on the Electric Supply System*. European Commission. Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability
- [Pesaran07] Pesaran, A., Market, T., Tataria, H., Howell, D. (2007). *Battery requirements for plug-in hybrid electric vehicles: analysis and rationale*. 23rd International Electric Vehicle Symposium and Exposition (EVS-23), Anaheim, California, 2-5 Diciembre, 2007.
- [Pike12] Pike Research (2012). *Electric Vehicles: 10 Predictions for 2013*.
- [Pistoia10] Pistoia, G. (2010). *Electric and Hybrid Vehicles: Power Sources, Models, Sustainability, Infrastructure and the Market*. Ed. Elsevier, Amsterdam.
- [Plotkin07] Plotkin, S. et. al. (2007). *Multi-Path Transportation Futures Study: Vehicle Characterization and Scenario Analyses*. Center for Transportation Research, Energy Systems Division, Argonne National Laboratory (ANL).
- [Presidencia10] Ministerio de la Presidencia. Comisión de Publicidad y Comunicación Institucional (2010). *Plan de Publicidad y Comunicación Institucional 2010*. Gobierno de España.
- [Pricewaterhouse10] Pricewaterhouse Coopers (2010). *Crecimiento inteligente. El modelo eléctrico español en 2030: Escenarios y alternativas*.

- [Pruyt08] Pruyt, E., van Daalen, C., Thissen, W., & Phaff, H. (2008). *Continuous System Modelling, System Dynamics*. Delft University of Technology.
- [Pserc08] Power Systems Engineering Research Center (PSERC) (2008). *Planning, Markets and Investment in the Electric Supply Industry*. PSERC Executive Forum, Marzo 2008.
- [Racc10] Real Automóvil Club de Cataluña (RACC) (2010). *La moto eléctrica a Barcelona*.
- [Race] Real Automóvil Club de España (RACE). Disponible en internet en: <http://www.race.es/>.
- [Ree] Red Eléctrica de España. Disponible en internet en: <https://demanda.ree.es/demanda.html>
- [Ree09] Red Eléctrica de España (2009). *Informe del sistema eléctrico español*.
- [Renault] Renault Z. E. Disponible en internet en: <http://www.renault-ze.com/>
- [Ritchie06] Ritchie, A., Howard, W. (2006). *Recent Developments and Likely Advances in Lithium-Ion Batteries*. Journal of Power Sources 162 (2006), 809-812.
- [Santamarta09] Santamarta, J., Cena, A. Revista World Watch (2009). *El coche eléctrico: el futuro del transporte, la energía y el medio ambiente*.
- [Schroeder12] Schroeder, A., Traber, T. (2012). *The economics of fast charging infrastructure for electric vehicles*. Energy Policy 43 (2012), 136–144.
- [Sen09] Sen, C., Kar, N. C. (2009). *Analysis of a Novel Battery Model to Illustrate the Instantaneous Voltage for a Hybrid Electric Vehicle*. Electric Vehicle Symposium 24 (EVS 24), Stavanger, Noruega, 13-16 Mayo, 2009.
- [Shukla11] Shukla, A., Pekny, J., Venkatasubramanian, V. (2011). *An optimization framework for cost effective design of refueling station infrastructure for*

- alternative fuel vehicles*. Computers & Chemical Engineering 35 (2011), 1431-1438.
- [Smith10] Smith, W. J. (2010). *Can EV (electric vehicles) address Ireland's CO2 emissions from transport?* Energy 35 (2010), 4514-4521.
- [Sovacool08] Sovacool, B. K., Hirsh, R. F. (2008). *Beyond batteries: An examination of the benefits and barriers to plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs) and a vehicle-to-grid (V2G) transition*. Energy Policy 37 (2009), 1095–1103.
- [Srinivasan04] Srinivasan, V., Newman, J. (2004). *Design and Optimization of a Natural Graphite/Iron Phosphate Lithium-Ion Cell*. Journal of the Electrochemical Society 151 (2004), A1530-A1538.
- [Sterman00] Sterman, John D. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Ed. Irwin McGraw-Hill.
- [Struben06a] Struben, J. (2006). *Essays on transition challenges for alternative propulsion vehicles and transportation systems*. Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology.
- [Struben06b] Struben, J. (2006). *Identifying challenges for sustained adoption of alternative fuel vehicles and infrastructure*. Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology.
- [Struben08] Struben, J., Sterman, J. D. (2008). *Transition challenges for alternative fuel vehicle and transportation systems*. Environment and Planning B: Planning and Design, 35 (6), 1070– 1097.
- [Sullivan09] Sullivan, J. L., Salmeen, I. T., Simon, C. P. (2009). *PHEV Marketplace Penetration An Agent Based Simulation*. Transportation Research Institute. University of Michigan.
- [Tao07] Tao, Z., Li, M. (2007). *System dynamics model of Hubbert peak for Chinas's oil*. Energy Policy 35 (2007), 2281–2286.

- [Thesen09] Thesen, S., Narodick, P. (2009). *The Better Place Paradigm: Creating Unlimited Electric Vehicle Range and New Demand for Renewable Energy*. Electric Vehicle Symposium 24 (EVS 24), Stavanger, Noruega, 13-16 Mayo, 2009.
- [Thiel10] Thiel, C., Perujo, A., Mercier, A. (2010). *Cost and CO<sub>2</sub> aspects of future vehicle options in Europe under new energy policy scenarios*. Energy Policy 38 (2010), 7142–7151.
- [Train04] Train, K. E., Winston, C. (2004). *Vehicle choice behavior and the declining market share of the US automakers*. International Economic Review 48 (2007), 1469-1496.
- [Useia10] U. S. Energy Information Administration (2010). *Annual Energy Outlook 2010 With Projections to 2035*.
- [Useia12] U. S. Energy Information Administration (2012). *Annual Energy Outlook 2012 With Projections to 2035*.
- [Usgs09] U. S. Geological Survey (2009). *Mineral Commodity Summaries. Lithium*
- [Usgs11] U. S. Geological Survey (2011). *Mineral Commodity Summaries. Lithium*
- [Van Mierlo06] Van Mierlo, J., Maggetto, G., Lataire, Ph. (2006). *Which energy source for road transport in the future? A comparison of battery, hybrid and fuel cell vehicles*. Energy Conversion and Management 47 (2006), 2748–2760.
- [Van Vliet11] Van Vliet, O., Brouwer, A. S., Kuramochi, T., Van den Broek, M., Faaij, A. (2011). *Energy use, cost and CO<sub>2</sub> emissions of electric cars*. Journal of Power Sources 196 (2011), 2298–2310.
- [Vectrix] Catálogo comercial de Vectrix Electrics. Disponible en internet en: <http://www.vectrix.es/>.

- [Vivienda10] Ministerio de Vivienda, Secretaría General Técnica, Subdirección General de Estudios y Estadísticas (2010). *Estimación del parque de viviendas*.
- [Vyas97] Vyas, A. D., Ng, H. K., Santini, D. J., Anderson, J. L. (1997). *Batteries for Electric Drive Vehicles: Evaluation of Future Characteristics and Costs through a Delphi Study*. Argonne National Laboratory. Transportation Technology R&D Center.
- [Walther10] Walther, G., Wansart, J., Kieckhäfer, K., Schnieder, E., Spengler, T. S. (2010). *Impact assessment in the automotive industry: Mandatory market introduction of alternative powertrain technologies*. System Dynamics Review 26 (2010), 239–261.
- [Wdi10] William Davidson Institute (2010). *Better Place: Charging into the future?*. Case 1-429-946. University of Michigan.
- [Weinert08] Weinert, J., Ogden, J., Sperling, D., Burke, A. (2008). *The future of electric two-wheelers and electric vehicles in China*. Energy Policy 36 (2008), 2544–2555.
- [Weiss00] Weiss, M. A., Heywood, J. B., Drake, E. M., Schafer, A. AuYeung, F. F. (2000). *On the road 2020. A life-cycle analysis of new automobile technologies*. Energy Laboratory (Massachusetts Institute of Technology).
- [Weiss12] Weiss, M., Patel, M. K., Junginger, M., Perujo, A., Bonnel, P., Grootveld, G. (2012). *On the electrification of road transport - Learning rates and price forecasts for hybrid-electric and battery-electric vehicles*. Energy Policy 48 (2012), 374–393.
- [Werber09] Werber, M., Fischer, M., Schwartz, P. V. (2009). *Batteries: Lower cost than gasoline?* Energy Policy 37 (2009), 2465–2468.
- [Zero] Catálogo comercial ZERO ZF6. Disponible en internet en: <http://www.zeromotorcycles.com/>.

## Capítulo 11

# Anexo I: Ecuaciones del modelo

En este anexo se va a encontrar el listado de ecuaciones del modelo de Vensim.

### *Bloque de Fabricación del Vehículo eléctrico*

años en renovar el parque de vehiculos=15

Units: Year

Demanda de VE=

compradores potenciales debido a las caracterisiticas del VE\*Ratio de atractivo

Units: VE/Year

demanda inicial de VE=0

Units: VE

entrega al cliente=

VE demandados/(tiempo de fabricación)

Units: VE/Year

parque de vehiculos= 2.1e+007

Units: vehiculos

reemplazamiento=

VE en funcionamiento\*renovacion del parque de vehiculos

Units: VE/Year

renovacion del parque de vehiculos=

1/años en renovar el parque de vehiculos

Units: Dmnl/Year

tiempo de fabricación=0.25

Units: Year

VE demandados= INTEG (VE deseados-entrega al cliente,demanda inicial de VE)

Units: VE

VE deseados=

Demanda de VE

Units: VE/Year

VE en funcionamiento= INTEG (entrega al cliente-reemplazamiento,VE iniciales en funcionamiento)

Units: VE

VE iniciales en funcionamiento=0

Units: VE

### ***Bloque de Evolución de las tecnologías***

años en renovar el parque de vehiculos= 15

Units: Year

autonomia de la bateria= capacidad de la bateria\*fracción de consumo por km de VE

Units: km

capacidad de la bateria= INTEG ( mejora efectiva de la bateria, capacidad media inicial)

Units: kwh

capacidad media inicial= 22

Units: kwh

ciclos de vida de la bateria= 2200

Units: ciclos

consumo medio de kwh de VE= 0.1378

Units: kwh/km

coste de la bateria= capacidad de la bateria\*curva descenso precio kwh(Time)

Units: Eur

curva descenso precio kwh ([[2010,0)-(2020,600)],(2010,500),(2020,243))

Units: Eur/kwh

fracción de consumo por km de VE= 1/(consumo medio de kwh de VE\*mejora de la eficiencia de los motores eléctricos (Time)\*mejora aerodinamica(Time))

Units: km/kwh

km a recorrer en la vida útil del VE= MIN(km a recorrer por VE debido a la batería, km teóricos en vida útil del VE )

Units: km

km a recorrer por VE debido a la batería= km máximos a recorrer por VE\*porcentaje de recargas no completas

Units: km

km máximos a recorrer por VE= autonomía de la batería\*ciclos de vida de la batería

Units: km

km medios anuales del VE= km a recorrer en la vida útil del VE/años en renovar el parque de vehículos

Units: km/Year

km medios anualmente de consumidor actual= 20000

Units: km

km teóricos en vida útil del VE= años en renovar el parque de vehículos\*km medios anualmente de consumidor actual

Units: km

mejora aerodinámica

([(2010,0)-(2020,2)],(2010,1),(2011,0.99),(2012,0.98),(2013,0.97),(2014,0.96),(2015,0.95),(2016,0.94),(2017,0.93),(2018,0.92),(2019,0.91),(2020,0.9))

Units: 1

mejora de la eficiencia de los motores eléctricos

( [(2010,0)-(2020,2)],(2010,1),(2011,0.98),(2012,0.96),(2013,0.94),(2014,0.92),(2015,0.9),(2016,0.88),(2017,0.86),(2018,0.84),(2019,0.82),(2020,0.8))

Units: 1

mejora efectiva de la batería= capacidad de la batería\*porcentaje de mejora de autonomía anual

Units: kwh/Year

porcentaje de mejora de autonomía anual= 0.02

Units: Dmnl/Year

porcentaje de recargas no completas= 0.75

Units: Dmnl

### ***Bloque de Costes del Vehículo eléctrico***

aumento del precio de la tarifa nocturna( [(2010,0)-(2020,10)],(2010,1),(2011,1.05),(2012,1.1),(2013,1.15),(2014,1.2),(2015,1.25),(2016,1.3),(2017,1.35),(2018,1.4),(2019,1.45),(2020,1.5))

Units: Dmnl

bus de alta tensión= 813

Units: Eur

capacidad de la batería= INTEG (mejora efectiva de la batería, capacidad media inicial)

Units: kwh

consumo medio de kwh de VE=0.1355

Units: kwh/km

consumo medio de un VC= ((Consumo medio de vehículo diesel\*Porcentaje de vehículos diesel)+(Consumo medio de vehículo gasolina\*Porcentaje de vehículos gasolina)\*mejora de la eficiencia de los motores(Time)\*mejora aerodinamica(Time))

Units: l/km

Consumo medio de vehículo diesel= 0.06

Units: l/km

Consumo medio de vehículo gasolina=0.08

Units: l/km

controlador del motor eléctrico([(2010,0)-(2020,2000)],(2010,1020),(2020,300))

Units: Eur

"convertidor AC/DC "=400

Units: Eur

"convertidor DC/DC "=300

Units: Eur

coste acumulado del VC= INTEG (costes anuales del VC, precio medio de vehículo convencional)

Units: Eur

coste acumulado del VE= INTEG (costes anuales del VE, precio medio del VE)

Units: Eur

coste anual de VC por gasolina= consumo medio de un VC\*km medios anuales del VE\*precio de litro de combustible al consumidor

Units: Eur/Year

coste anual de VE por electricidad= consumo medio de kwh de VE\*km medios anuales del VE\*precio de la electricidad

Units: Eur/Year

Coste de acondicionamiento de garaje comunitario para recarga de VE= 900

Units: Eur

coste de acondicionamiento del garaje= Porcentaje de población en vivienda unifamiliar\*Coste de acondicionamiento garaje individual para recarga del

VE+Porcentaje de población en vivienda de bloque\*Coste de acondicionamiento de garaje comunitario para recarga de VE

Units: Eur

Coste de acondicionamiento garaje individual para recarga del VE= 100

Units: Eur

coste de la bateria= capacidad de la bateria\*curva descenso precio kwh(Time)

Units: Eur

coste de la electricidad en horario nocturno= 0.060736

Units: Eur/kwh

coste de la electricidad en horario normal( [(2010,0.1)-(2020,0.2)],(2010,0.144),(2015,0.164),(2020,0.18))

Units: Eur/kwh

coste de la transmision=160

Units: Eur

coste de mantenimiento anual del VC= km medios anuales del VE\*"coste de mantenimiento del VC/km"

Units: Eur/Year

coste de mantenimiento anual del VE= "coste de mantenimiento del VE/km"\*km medios anuales del VE

Units: Eur/Year

"coste de mantenimiento del VC/km"=0.03

Units: Eur/km

"coste de mantenimiento del VE/km"=0.02

Units: Eur/km

coste del cableado y cargador del VE=480

Units: Eur

costes anuales del VC= coste anual de VC por gasolina+coste de mantenimiento anual del VC

Units: Eur/Year

costes anuales del VE= coste de mantenimiento anual del VE+coste anual de VE por electricidad

Units: Eur/Year

curva de evolucion del precio del petroleo( [(2010,0)-(2020,200)],(2010,64.54),(2011,67.77),(2012,71.16),(2013,74.72),(2014,78.45),(2015,82.34),(2016,86.5),(2017,90.82),(2018,95.36),(2019,100.13),(2020,105.14))

Units: Eur/barrel

"curva descenso 2%"([(2010,0)-  
(2020,2)],(2010,1),(2011,0.98),(2012,0.96),(2013,0.94),(2014,0.92  
) ,(2015,0.9),(2016,0.88),(2017,0.86),(2018,0.84),(2019,0.82),(2020,0.8))  
Units: Dmnl

Gasto del Gobierno en subvenciones a la compra= INTEG (gasto al año en  
subvenciones a la compra, 0)  
Units: Eur

Impuestos indirectos gasoil= 0.36751  
Units: Eur/l

Impuestos indirectos gasolina=0.46273  
Units: Eur/l

Impuestos indirectos medios= (Porcentaje de vehículos diesel\*Impuestos indirectos  
gasoil)+(Porcentaje de vehículos gasolina\*Impuestos indirectos gasolina)  
Units: Eur/l

Incremento del precio por margen de gasolineras y transportes=0.25  
Units: Dmnl

IVA( [(2010,0)-(2020,0.3)],(2010,0.18),(2011,0.18),(2012,0.18),(2012.7,0.21),(2013  
,0.21),(2014,0.21),(2015,0.21),(2016,0.21),(2017,0.21),(2018,0.21),(2019,0.21  
) ,(2020,0.21))  
Units: Dmnl

km medios anuales del VE= km a recorrer en la vida útil del VE/años en renovar el  
parque de vehiculos  
Units: km/Year

litros de petroleo en cada barril=159  
Units: l/barrel

mejora aerodinamica([(2010,0)-  
(2020,2)],(2010,1),(2011,0.99),(2012,0.98),(2013,0.97),(2014,0.96  
) ,(2015,0.95),(2016,0.94),(2017,0.93),(2018,0.92),(2019,0.91),(2020,0.9))  
Units: 1

mejora de la eficiencia de los motores( [(2010,0)-  
(2020,2)],(2010,1),(2011,0.995),(2012,0.99),(2013,0.985),(2014,0.98  
) ,(2015,0.975),(2016,0.97),(2017,0.965),(2018,0.96),(2019,0.955),(2020,0.95  
)  
Units: 1

Porcentaje de población en vivienda de bloque=0.72  
Units: Dmnl

Porcentaje de población en vivienda unifamiliar=0.28

Units: Dmnl

porcentaje de usuarios a utilizar horario nocturno= 0.8

Units: Dmnl

Porcentaje de vehículos diesel=0.518

Units: Dmnl

Porcentaje de vehículos gasolina=1-Porcentaje de vehículos diesel

Units: Dmnl

precio de la electricidad= (porcentaje de usuarios a utilizar horario nocturno\*coste de la electricidad en horario nocturno\*aumento del precio de la tarifa nocturna(Time))+ (coste de la electricidad en horario normal(Time)\*(1-porcentaje de usuarios a utilizar horario nocturno))

Units: Eur/kwh

precio de litro de combustible al consumidor= (precio litro de petroleo antes de impuestos+Impuestos indirectos medios)\*(1+IVA(Time))\*(1+Incremento del precio por margen de gasolineras y transportes)

Units: Eur/l

precio litro de petroleo antes de impuestos= curva de evolucion del precio del petroleo(Time)/litros de petroleo en cada barril

Units: Eur/l

precio medio de vehículo convencional=20000

Units: Eur

precio medio del VE= precio medio de vehículo convencional-reducción del coste del motor frente al de combustion+coste del cableado y cargador del VE+coste de la transmision+controlador del motor eléctrico(Time)+"convertidor AC/DC"+"convertidor DC/DC"+sistemas asociados a la batería+bus de alta tensión+coste de la bateria+coste de acondicionamiento del garaje-IF THEN ELSE(Gasto del Gobierno en subvenciones a la compra<Presupuesto del IDAE para adquisición de VE, valor de la subvencion a la compra del VE(Time),0)

Units: Eur

Presupuesto del IDAE para adquisición de VE=2.48e+008

Units: Eur

reducción del coste del motor frente al de combustion=1000

Units: Eur

sistemas asociados a la batería=553 + 10.6\*capacidad de la bateria

Units: Eur

valor de la subvencion a la compra del VE( [(2010,0)-(2020,8000)],(2010,6000),(2011,6000),(2012,6000),(2013,6000),(2014,6000),(2015,6000),(2016,6000),(2017,6000),(2018,6000),(2019,6000),(2020,6000))

Units: Eur/VE

***Bloque del Atractivo del Vehículo eléctrico***

atractivo= Retardo por la falta de modelos a comprar\*efecto del tiempo de amortización del VE frente al VC(Ratio de amortizacion del VE vs VC )\*Ratio de preocupacion en funcion de la autonomia\*Curva de influencia de la publicidad(Gasto en publicidad del Gobierno)\*Curva de preocupacion en funcion de los puntos de recarga(MIN(Proporcion de puntos de recarga respecto al numero de VE,2))\*IF THEN ELSE( Curva de despreocupacion en funcion del numero de estaciones de intercambio de baterias(Proporcion de estaciones de cambio de bateria respecto al numero de VE)=0.75, (1/Ratio de preocupacion en funcion de la autonomia) ,(1/Curva de despreocupacion en funcion del numero de estaciones de intercambio de baterias(Proporcion de estaciones de cambio de bateria respecto al numero de VE)))

Units: Dmnl

atractivo boca a boca= posibles compradores potenciales contactados por año\*atractivo

Units: 1/Year

autonomia de la bateria= capacidad de la bateria\*fracción de consumo por km de VE

Units: km

constante cálculo rentabilidad= constante de consumo\*constante de impuestos en la gasolina

Units: 1/Year

constante de consumo= consumo medio de un VC\*km medios anuales del VE

Units: 1/Year

constante de impuestos en la gasolina= (1+IVA(Time))+Incremento del precio por margen de gasolineras y transportes+(IVA(Time)\*Incremento del precio por margen de gasolineras y transportes))

Units: Dmnl

consumo medio de un VC= ((Consumo medio de vehículo diesel\*Porcentaje de vehículos diesel)+(Consumo medio de vehículo gasolina\*Porcentaje de vehículos gasolina)\*mejora de la eficiencia de los motores(Time)\*mejora aerodinamica(Time))

Units: l/km

contactos por el boca a boca al año= 2

Units: Dmnl/Year

coste anual de VE por electricidad= consumo medio de kwh de VE\*km medios anuales del VE\*precio de la electricidad

Units: Eur/Year

coste de mantenimiento anual del VC= km medios anuales del VE\*"coste de mantenimiento del VC/km"

Units: Eur/Year

coste de mantenimiento anual del VE= “coste de mantenimiento del VE/km”\*km  
medios anuales del VE

Units: Eur/Year

Curva de despreocupacion en funcion del numero de estaciones de intercambio de baterías([(0,0)-(20000,1)],(0,0.75),(2432,0.75),(20000,1))

Units: \*\*undefined\*\*

Curva de influencia de la publicidad( [(0,0)-  
(30,2)],(0,0),(2,0.2),(4,0.3),(6,0.4),(8,0.5),(10,0.6),(12,0.7),(14  
,0.8),(16,0.9),(18,1),(20,1.05),(22,1.1),(24,1.15),(26,1.2),(28,1.25),(30,1.3))

Units: 1

Curva de preocupacion en funcion de la autonomia( [(100,0)-  
(400,1)],(100,0.5),(150,0.75),(200,0.8),(250,0.85),(300,0.9),(350,0.95),(400,1))

Units: Dmnl

Curva de preocupacion en funcion de los puntos de recarga( [(0,0)-  
(2,1)],(0,0.71),(1,0.85),(1.5,0.92),(2,1))

Units: Dmnl

Curva de prevision de puntos de recarga rapida segun el Gobierno extrapolada a 2020  
([(2010,0)-(2020,1000)],(2010,0),(2011,10),(2012,30),(2013,70),(2014,160),(  
2014.77,254),(2015.6,352),(2016.54,466),(2017.52,596),(2018.78,740),(2020.03  
,910))

Units: Dmnl

Curva de prevision de puntos de recarga segun el Gobierno extrapolada a 2020  
([(2010,0)-(2020,220000)],(2010,1250),(2011,5600),(2012,15350),(2013,34850)  
,(2014,80350),(2015,110000),(2016,130000),(2017,150000),(2018,170000),(2019  
,190000),(2020,210000))

Units: Puntos de recarga

curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen( [(2010,0)-  
(2020,1)],(2010,0.7507),(2011,0.7648),(2012,0.7972),(2013,0.8296),(2014,0.856),(2015  
,0.8745),(2016,0.8935),(2017,0.9088),(2018,0.9251),(2019,0.9356),(2020,0.9449))

Units: Eur/l

Demanda de VE= compradores potenciales debido a las caracteristicas del VE\*Ratio  
de atractivo

Units: VE/Year

efecto del tiempo de amortización del VE frente al VC(  
[(0,0)-(13,1)],(1,1),(2,0.59),(3,0.557018),(4,0.473684),(5,0.39),(6,0.3),(  
7,0.20614),(8,0.16),(9,0.15),(10,0.14),(11,0.13),(12,0.12),(13,0.11))

Units: Dmnl

Gasto en publicidad del Gobierno= 2

Units: Eur

Incremento del precio por margen de gasolineras y transportes= 0.25

Units: Dmnl

IVA([(2010,0)-(2020,0.3)],(2010,0.18),(2011,0.18),(2012,0.18),(2012.7,0.21),(2013,0.21),(2014,0.21),(2015,0.21),(2016,0.21),(2017,0.21),(2018,0.21),(2019,0.21),(2020,0.21))

Units: Dmnl

km medios anuales del VE= km a recorrer en la vida útil del VE/años en renovar el parque de vehiculos

Units: km/Year

Numero de estaciones de cambio de baterías= Retardo a la implantación de estaciones de recarga\*(VE en funcionamiento\*0.0002)

Units: 1

parque de vehiculos= 2.1e+007

Units: vehiculos

Porcentaje de compradores potenciales respecto al parque= compradores potenciales debido a las caracterisiticas del VE/parque de vehiculos

Units: 1

posibles compradores contactados por año= VE en funcionamiento\*contactos por el boca a boca al año/parque de vehiculos

Units: 1/Year

posibles compradores potenciales contactados por año= Porcentaje de compradores potenciales respecto al parque\*posibles compradores contactados por año

Units: 1/Year

precio medio de vehículo convencional= 20000

Units: Eur

precio medio del VE= precio medio de vehículo convencional-reducción del coste del motor frente al de combustion+coste del cableado y cargador del VE+coste de la trasmision+controlador del motor eléctrico(Time)+"convertidor AC/DC"+"convertidor DC/DC"+sistemas asociados a la batería+bus de alta tensión+coste de la bateria+coste de acondicionamiento del garaje-IF THEN ELSE(Gasto del Gobierno en subvenciones a la compra<Presupuesto del IDAE para adquisición de VE, valor de la subvencion a la compra del VE(Time),0)

Units: Eur

Proporción de estaciones de cambio de bateria respecto al numero de VE= IF THEN ELSE(VE en funcionamiento>0:AND:Numero de estaciones de cambio de baterías >0,VE en funcionamiento/Numero de estaciones de cambio de baterías,20000)

Units: VE

Proporcion de puntos de recarga rapida respecto al numero de VE= IF THEN ELSE(VE en funcionamiento>0, Curva de prevision de puntos de recarga rapida segun el Gobierno extrapolada a 2020(Time)/VE en funcionamiento,0)

Units: 1/VE

Proporcion de puntos de recarga respecto al numero de VE= IF THEN ELSE(VE en funcionamiento>0, Curva de prevision de puntos de recarga segun el Gobierno extrapolada a 2020(Time)/VE en funcionamiento,0)

Units: 1

Ratio de amortizacion del VE vs VC= IF THEN ELSE((precio medio del VE+coste de mantenimiento anual del VE+coste anual de VE por electricidad)<=(precio medio de vehículo convencional+coste de mantenimiento anual del VC+(constante cálculo rentabilidad\*curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time))),1 , IF THEN ELSE((precio medio del VE+coste de mantenimiento anual del VE\*2+coste anual de VE por electricidad\* 2.02)<=(precio medio de vehículo convencional+coste de mantenimiento anual del VC\*2+(constante cálculo rentabilidad\*(curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+1)))), 2, IF THEN ELSE((precio medio del VE+coste de mantenimiento anual del VE\*3+coste anual de VE por electricidad\*3.04)<=(precio medio de vehículo convencional+coste de mantenimiento anual del VC\*3+(constante cálculo rentabilidad\*(curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+1)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+2)))), 3, IF THEN ELSE((precio medio del VE+coste de mantenimiento anual del VE\*4+coste anual de VE por electricidad\*4.06)<=(precio medio de vehículo convencional+coste de mantenimiento anual del VC\*4+(constante cálculo rentabilidad\*(curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen (Time)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+1)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+2)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+3)))), 4, IF THEN ELSE((precio medio del VE+coste de mantenimiento anual del VE\*5+coste anual de VE por electricidad\*5.08)<=(precio medio de vehículo convencional+coste de mantenimiento anual del VC\*5+(constante cálculo rentabilidad\*(curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+1)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+2)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+3)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+4)))), 5, IF THEN ELSE((precio medio del VE+coste de mantenimiento anual del VE\*6+coste anual de VE por electricidad\*6.1)<=(precio medio de vehículo convencional+coste de mantenimiento anual del VC\*6+(constante cálculo rentabilidad\*(curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+1)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+2)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+3)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+4)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+5)))), 6, IF THEN ELSE((precio medio del VE+coste de mantenimiento anual del VE\*7+coste anual de VE por electricidad\*7.12)<=(precio medio de vehículo convencional+coste de mantenimiento anual del VC\*7+(constante cálculo rentabilidad\*(curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+1)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+2)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+3)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+4)+curva

evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+5)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+6))), 7, IF THEN ELSE((precio medio del VE+coste de mantenimiento anual del VE\*8+coste anual de VE por electricidad\*8.14)<=(precio medio de vehículo convencional+coste de mantenimiento anual del VC\*8+(constante cálculo rentabilidad\*(curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+1)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+2)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+3)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+4)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+5)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+6)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+7))))) , 8, IF THEN ELSE((precio medio del VE+coste de mantenimiento anual del VE\*9+coste anual de VE por electricidad\*9.16)<=(precio medio de vehículo convencional+coste de mantenimiento anual del VC\*9+(constante cálculo rentabilidad\*(curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+1)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+2)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+3)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+4)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+5)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+6)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+7)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+8))))) , 9, 10)))))))))

Units: Dmnl

Ratio de atractivo= (atractivo+atractivo boca a boca)\*renovacion del parque de vehiculos

Units: VE/Year

Ratio de preocupacion en funcion de la autonomia= Curva de preocupacion en funcion de la autonomia(autonomia de la bateria)

Units: Dmnl

renovacion del parque de vehiculos= 1/años en renovar el parque de vehiculos

Units: Dmnl/Year

Retardo a la implantación de estaciones de recarga= RAMP( 1/6, 2014 ,2020 )

Units: Dmnl

Retardo por la falta de modelos a comprar= RAMP( 1/2, 2010.5 ,2012.5 )

Units: Dmnl

VE en funcionamiento= INTEG (entrega al cliente-reemplazamiento, VE iniciales en funcionamiento)

Units: VE

***Bloque de Demanda del Vehículo eléctrico***

años en renovar el parque de vehiculos= 15

Units: Year

autonomia de la bateria= capacidad de la bateria\*fracción de consumo por km de VE  
Units: km

compradores potenciales debido a las caracterisiticas del VE= parque de vehiculos\*Disponibilidad de garaje privado\*Distancia de la residencia al centro urbano\*Satisfacer necesidades de transporte urbano  
Units: vehiculos

Cuota de mercado de renovación de VE= IF THEN ELSE(Time<2011, 0,Demanda de VE\*100/(renovacion del parque de vehiculos\*parque de vehiculos))  
Units: 1

Cuota de mercado en funcionamiento de VE= VE en funcionamiento\*100/parque de vehiculos  
Units: Dmnl

curva de distancia de la residencia al centro urbano  
([(160,0)-(400,1)],(160,0.9),(400,1))  
Units: Dmnl

Demanda de VE= compradores potenciales debido a las caracterisiticas del VE\*Ratio de atractivo  
Units: VE/Year

Disponibilidad de garaje privado= 0.77  
Units: Dmnl

Distancia de la residencia al centro urbano= curva de distancia de la residencia al centro urbano(autonomia de la bateria)  
Units: Dmnl

media de compra de VE anual potencial= media de compra de vehiculos anual\*Porcentaje de compra potencial del VE respecto al renovacion del parque  
Units: vehiculos/Year

media de compra de vehiculos anual= parque de vehiculos/años en renovar el parque de vehiculos  
Units: vehiculos/Year

parque de vehiculos= 2.1e+007  
Units: vehiculos

Porcentaje de compra potencial del VE respecto al renovacion del parque= compradores potenciales debido a las caracterisiticas del VE/parque de vehiculos  
Units: 1

Porcentaje de compradores potenciales respecto al parque= compradores potenciales debido a las caracterisiticas del VE/parque de vehiculos  
Units: 1

Ratio de atractivo= (atractivo+atractivo boca a boca)\*renovacion del parque de vehiculos

Units: VE/Year

renovacion del parque de vehiculos=1/años en renovar el parque de vehiculos

Units: Dmnl/Year

Satisfacer necesidades de transporte urbano= 0.83

Units: Dmnl

VE en funcionamiento= INTEG (entrega al cliente-reemplazamiento, VE iniciales en funcionamiento)

Units: VE

### ***Bloque del Medio Ambiente***

Ahorro generado por tasas de CO2= INTEG (tasas no consumidas por año,0)

Units: Eur

"CO2 emitido por año por el Well-To-Tank del VE"= "CO2/km emitido Well-To-Tank VE"\*km medios anuales del VE\*VE en funcionamiento\*(1/1e+006)

Units: Ton/Year

CO2 no emitido por año por uso del VE= VE en funcionamiento\*"CO2/km emitido medio por vehículo convencional anualmente (Tank-to-wheel)"\*km medios anuales del VE\*(1/1e+006)\*"curva descenso 2% "(Time)

Units: Ton/Year

"CO2 no emitido por el Well-To-Tank del VC"= "CO2/km emitido Well-To-Tank VC"\*km medios anuales del VE\*VE en funcionamiento\*(1/1e+006)

Units: Ton/Year

"CO2/km emitido medio por vehículo convencional anualmente (Tank-to-wheel)"  
= 138

Units: g/(km\*vehiculos)

"CO2/km emitido Well-To-Tank gasoil"= "Emision CO2 Well-To-Tank gasoil"\*Consumo medio de vehículo diesel

Units: g/km

"CO2/km emitido Well-To-Tank gasolina"= "Emision CO2 Well-To-Tank gasolina"\*Consumo medio de vehículo gasolina

Units: g/km

"CO2/km emitido Well-To-Tank VC"= ("CO2/km emitido Well-To-Tank gasoil"\*Porcentaje de vehículos diesel)+("CO2/km emitido Well-To-Tank gasolina"\*Porcentaje de vehículos gasolina)

Units: g/km

"CO2/km emitido Well-To-Tank VE"= "CO2/kwh emitido Well-To-Tank VE"\*consumo medio de kwh de VE

Units: g/km

"CO2/kwh emitido Well-To-Tank VE"= (Emisiones CO2 Carbón\*Evolución del peso del carbón en el mix energético(Time))+ (Emisiones CO2 Ciclo Combinado de Gas Natural\*Evolución del peso del ciclo combinado en el mix energético(Time))+ (Emisiones CO2 Cogeneración\*Evolución del peso de la cogeneración en el mix energético(Time))+ (Emisiones CO2 Energía nuclear\*Evolución del peso de la energía nuclear en el mix energético(Time))+ (Emisiones CO2 Eólica\*Evolución del peso de la energía eólica en el mix energético(Time))+ (Emisiones CO2 fotovoltaica y biomasa\*Evolución del peso de la energía fotovoltaica y biomasa en el mix energético(Time))+ (Emisiones CO2 Hidráulica\*Evolución del peso de la energía hidráulica en el mix energético(Time))+ (Emisiones CO2 Térmica de Fuel\*Evolución del peso de la térmica de fuel en el mix energético(Time))

Units: g/kwh

consumo medio de kwh de VE= 0.1355

Units: kwh/km

Consumo medio de vehículo diesel= 0.06

Units: l/km

Consumo medio de vehículo gasolina= 0.08

Units: l/km

conversion kwh a MJ= 3.6

Units: MJ/kwh

"curva descenso 2%"([(2010,0)-(2020,2)],(2010,1),(2011,0.98),(2012,0.96),(2013,0.94),(2014,0.92),(2015,0.9),(2016,0.88),(2017,0.86),(2018,0.84),(2019,0.82),(2020,0.8))

Units: Dmnl

Densidad de energía de gasoil= 35.8592

Units: MJ/l

Densidad de energía de gasolina= 32.184

Units: MJ/l

"Emission CO2 Well-To-Tank gasoil"= Densidad de energía de gasoil\*Emission de CO2 por MJ gasoil

Units: g/l

"Emission CO2 Well-To-Tank gasolina"= Densidad de energía de gasolina\*Emisión de CO2 por MJ gasolina

Units: g/l

Emission de CO2 por MJ gasoil= 14

Units: g/MJ

Emisiones CO2 Carbón= 950

Units: g/kwh

Emisiones CO2 Ciclo Combinado de Gas Natural= 370

Units: g/kwh

Emisiones CO2 Cogeneración= 370

Units: g/kwh

Emisiones CO2 Energía nuclear= 0

Units: g/kwh

Emisiones CO2 Eólica= 0

Units: g/kwh

Emisiones CO2 fotovoltaica y biomasa= 0

Units: g/kwh

Emisiones CO2 Hidráulica= 0

Units: g/kwh

Emisiones CO2 Térmica de Fuel= 700

Units: g/kwh

Emisión de CO2 por MJ gasolina= 13

Units: g/MJ

Evolución del peso de la cogeneración en el mix energético( [(2010,0)-(2020,1)],(2010,0.104),(2011,0.104),(2012,0.104),(2013,0.104),(2014,0.104),(2015,0.104),(2016,0.104),(2017,0.104),(2018,0.104),(2019,0.104),(2020,0.104))

Units: Dmnl

Evolución del peso de la energía eólica en el mix energético( [(2010,0)-(2020,1)],(2010,0.138),(2011,0.138),(2012,0.138),(2013,0.138),(2014,0.138),(2015,0.138),(2016,0.138),(2017,0.138),(2018,0.138),(2019,0.138),(2020,0.138))

Units: Dmnl

Evolución del peso de la energía fotovoltaica y biomasa en el mix energético ([[(2010,0)-(2020,1)],(2010,0.042),(2011,0.042),(2012,0.042),(2013,0.042),(2014,0.042),(2015,0.042),(2016,0.042),(2017,0.042),(2018,0.042),(2019,0.042),(2020,0.042)])

Units: Dmnl

Evolución del peso de la energía hidráulica en el mix energético( [(2010,0)-(2020,1)],(2010,0.111),(2011,0.111),(2012,0.111),(2013,0.111),(2014,0.111),(2015,0.111),(2016,0.111),(2017,0.111),(2018,0.111),(2019,0.111),(2020,0.111))

Units: Dmnl

Evolución del peso de la energía nuclear en el mix energético( [(2010,0)-(2020,1)],(2010,0.19),(2011,0.19),(2012,0.19),(2013,0.19),(2014,0.19),(2015,0.19),(2016,0.19),(2017,0.19),(2018,0.19),(2019,0.19),(2020,0.19))

Units: Dmnl

Evolución del peso de la térmica de fuel en el mix energético( [(2010,0)-(2020,1)],(2010,0.01),(2011,0.01),(2012,0.01),(2013,0.01),(2014,0.01),(2015,0.01),(2016,0.01),(2017,0.01),(2018,0.01),(2019,0.01),(2020,0.01))

Units: Dmnl

Evolución del peso del carbón en el mix energético( [(2010,0)-(2020,1)],(2010,0.12),(2011,0.12),(2012,0.12),(2013,0.12),(2014,0.12),(2015,0.12),(2016,0.12),(2017,0.12),(2018,0.12),(2019,0.12),(2020,0.12))

Units: Dmnl

Evolución del peso del ciclo combinado en el mix energético( [(2010,0)-(2020,1)],(2010,0.29),(2011,0.29),(2012,0.29),(2013,0.29),(2014,0.29),(2015,0.29),(2016,0.29),(2017,0.29),(2018,0.29),(2019,0.29),(2020,0.29))

Units: Dmnl

km medios anuales del VE= km a recorrer en la vida útil del VE/años en renovar el parque de vehiculos

Units: km/Year

Media energetica anual del vehiculo electrico= consumo medio de kwh de VE\*km medios anuales del VE\*conversion kwh a MJ

Units: MJ/Year

Media energetica del vehiculo convencional= (Densidad de energía de gasoil\*Porcentaje de vehículos diesel\*Consumo medio de vehículo diesel)+(Densidad de energía de gasolina\*Porcentaje de vehículos gasolina\*Consumo medio de vehículo gasolina)

Units: MJ/km

Media energetica vehiculo convencional anual= km medios anuales del VE\*Media energetica del vehiculo convencional

Units: MJ/Year

Porcentaje de vehículos diesel= 0.518

Units: Dmnl

Porcentaje de vehículos gasolina= 1-Porcentaje de vehículos diesel

Units: Dmnl

tasa por tonelada de CO2= 7.5

Units: Eur/Ton

tasas no consumidas por año= tasa por tonelada de CO2\*Ton CO2 no emitidas por VE

Units: Eur/Year

Ton CO2 no emitidas por VE= CO2 no emitido por año por uso del VE+"CO2 no emitido por el Well-To-Tank del VC"- "CO2 emitido por año por el Well-To-Tank del VE"

Units: Ton/Year

Ton de CO2 no emitido= INTEG (Ton CO2 no emitidas por VE, 0)

Units: Ton

VE en funcionamiento= INTEG (entrega al cliente-reemplazamiento, VE iniciales en funcionamiento)

Units: VE

### ***Bloque de Decisiones del Gobierno***

Curva de prevision de puntos de recarga segun el Gobierno extrapolada a 2020  
([(2010,0)-  
(2020,220000)],(2010,1250),(2011,5600),(2012,15350),(2013,34850),(2014,80350),(2015,110000),(2016,130000),(2017,150000),(2018,170000),(2019,190000),(2020,210000))

Units: Puntos de recarga

entrega al cliente= VE demandados/(tiempo de fabricación)

Units: VE/Year

entrega al cliente motocicleta= Motocicletas eléctricas demandadas/tiempo de fabricacion motocicleta eléctrica

Units: motocicletas/Year

gasto al año en subvenciones= gasto al año en subvenciones a la compra+gastos al año en puntos de recarga

Units: Eur/Year

gasto al año en subvenciones a la compra= (entrega al cliente\*IF THEN ELSE(Gasto del Gobierno en subvenciones a la compra<Presupuesto del IDAE para adquisición de VE, valor de la subvencion a la compra del VE(Time),0))+ (entrega al cliente motocicleta\*IF THEN ELSE(Gasto del Gobierno en subvenciones a la compra<Presupuesto del IDAE para adquisición de VE, valor de la subvencion a la compra de motocicleta electrica(Time),0))

Units: Eur/Year

Gasto del Gobierno en subvenciones= INTEG (gasto al año en subvenciones,0)

Units: Eur

Gasto del Gobierno en subvenciones a la compra= INTEG (gasto al año en subvenciones a la compra,0)

Units: Eur

Gasto del Gobierno en subvenciones a los puntos de recarga= INTEG (gastos al año en puntos de recarga,0)

Units: \*\*undefined\*\*

gastos al año en puntos de recarga= IF THEN ELSE(Gasto del Gobierno en subvenciones a los puntos de recarga<Presupuesto del IDAE para puntos de recarga , Curva de prevision de puntos de recarga segun el Gobierno extrapolada a 2020 (Time)\*valor de la subvencion al punto de recarga(Time),0)

Units: Eur/Year

Gráfico de los objetivos de España= Objetivos de VE en España según el Gobierno(Time)

Units: VE

Objetivos de VE en España según el Gobierno( [(2010,0)-(2020,1e+006)],(2010,2000),(2011,20000),(2012,50000),(2013,140351),(2014,250000),(2015,350000),(2016,470000),(2017,590000),(2017.98,720000),(2019,840000),(2020,960000))

Units: VE

Presupuesto del IDAE para adquisición de VE= 2.48e+008

Units: Eur

Presupuesto del IDAE para puntos de recarga= 1.5e+006

Units: Eur

valor de la subvencion a la compra de motocicleta electrica([(2010,0)-(2020,2000)],(2010,1200),(2011,1200),(2012,1200),(2013,1200),(2014,1200),(2015,1200),(2016,1200),(2017,1200),(2018,1200),(2019,1200),(2020,1200))

Units: Eur

valor de la subvencion a la compra del VE( [(2010,0)-(2020,8000)],(2010,6000),(2011,6000),(2012,6000),(2013,6000),(2014,6000),(2015,6000),(2016,6000),(2017,6000),(2018,6000),(2019,6000),(2020,6000))

Units: Eur/VE

valor de la subvencion al punto de recarga( [(2010,0)-(2020,8000)],(2010,2000),(2011,2000),(2012,2000),(2013,2000),(2014,2000),(2015,2000),(2016,2000),(2017,2000),(2018,2000),(2019,2000),(2020,2000))

Units: Eur/Puntos de recarga

VE en funcionamiento= INTEG (entrega al cliente-reemplazamiento, VE iniciales en funcionamiento)

Units: VE

### ***Bloque de Motocicletas***

años en renovar el parque de motocicletas= 10

Units: Year

atractivo boca a boca moto electrica= atractivo de motocicleta eléctrica\*posibles compradores de motocicletas contactados por año

Units: 1/Year

atractivo de motocicleta eléctrica= Disponibilidad del cliente a pagar más por la motocicleta eléctrica(IF THEN ELSE(Ratio amortizacion motocicleta electrica vs motocicleta convencional<3, Precio medio motocicleta eléctrica\*0.9/Precio medio motocicleta convencional, Precio medio motocicleta eléctrica/Precio medio motocicleta convencional))\*ratio preocupacion por la autonomia de la motocicleta electrica\*Curva de preocupacion en funcion de los puntos de recarga(MIN(Proporción puntos de recarga en funcion de motocicletas electricas,2))

Units: 1

autonomia bateria motocicleta eléctrica media=((autonomia batería motocicleta eléctrica inferior 125cc\*("Porcentaje población de motocicletas <125cc"+"Porcentaje población de motocicletas <75cc"))+(autonomía batería motocicleta eléctrica superior 125cc \*"Porcentaje población de motocicletas <250cc"))/Porcentaje de población de motocicletas estudiadas

Units: km

autonomia batería motocicleta eléctrica inferior 125cc= capacidad de la batería de la motocicleta eléctrica inferior 125cc/Consumo medio de motocicleta eléctrica

Units: km

autonomía batería motocicleta eléctrica superior 125cc= capacidad de la batería de la motocicleta eléctrica superior 125cc/Consumo medio de motocicleta eléctrica

Units: km

bus alta tensión motocicleta= 500

Units: Eur

capacidad de la batería de la motocicleta eléctrica inferior 125cc= INTEG (mejora efectiva de la batería motocicleta eléctrica inferior 125cc, capacidad de la batería de motocicleta inicial inferior 125cc)

Units: kwh

capacidad de la batería de la motocicleta eléctrica superior 125cc= INTEG (mejora efectiva de la batería motocicleta eléctrica superior 125cc, capacidad de la batería de motocicleta inicial superior a 125cc)

Units: kwh

capacidad de la batería de motocicleta inicial inferior 125cc= 3.7

Units: kwh

capacidad de la batería de motocicleta inicial superior a 125cc= 6

Units: kwh

capacidad de la batería de motocicleta media= ((capacidad de la batería de la motocicleta eléctrica inferior 125cc\*("Porcentaje población de motocicletas <125cc"

+ "Porcentaje población de motocicletas <75cc"))+(capacidad de la batería de la motocicleta eléctrica superior 125cc\*"Porcentaje población de motocicletas <250cc"))/Porcentaje de población de motocicletas estudiadas

Units: kwh

compradores potenciales de motocicleta electrica debido a características limitadoras = Desplazamientos por ciudad\*Recorridos diarios con autonomía suficiente\*Población que aparca la motocicleta en garaje\*Porcentaje de parque potencial para motocicleta eléctrica según cilindrada

Units: motocicletas

constante calculo rentabilidad motocicletas= constante consumo motocicleta convencional\*constante de impuestos en la gasolina

Units: l/Year

constante consumo motocicleta convencional= Consumo medio de motocicleta convencional\*kilometros medios anuales recorridos por motocicleta

Units: l/Year

constante de impuestos en la gasolina= (1+IVA(Time)+Incremento del precio por margen de gasolineras y transportes+(IVA(Time)\*Incremento del precio por margen de gasolineras y transportes))

Units: Dmnl

Consumo medio de motocicleta convencional= 0.038

Units: l/km

Consumo medio de motocicleta eléctrica= 0.04

Units: kwh/km

contactos por el boca a boca al año= 2

Units: Dmnl/Year

controlador del motor eléctrico([(2010,0)-(2020,2000)],(2010,1020),(2020,300))

Units: Eur

"convertidor AC/DC"= 400

Units: Eur

"convertidor DC/DC"= 300

Units: Eur

Coste acumulado motocicleta convencional= INTEG (costes anuales motocicleta convencional, Precio medio motocicleta convencional)

Units: Eur

Coste acumulado motocicleta eléctrica= INTEG (costes anuales motocicleta eléctrica, Precio medio motocicleta eléctrica)

Units: Eur

coste anual electricidad motocicleta electrica= Consumo medio de motocicleta eléctrica\*kilometros medios anuales recorridos por motocicleta\*precio de la electricidad  
Units: Eur/Year

coste anual gasolina motocicleta convencional= kilometros medios anuales recorridos por motocicleta\*precio de litro de combustible al consumidor\*Consumo medio de motocicleta convencional  
Units: Eur/Year

coste de la batería en motocicleta eléctrica medio= ((coste de la batería motocicleta inferior 125cc\*( $\text{"Porcentaje población de motocicletas } <125\text{cc"}$  +  $\text{"Porcentaje población de motocicletas } <75\text{cc"}$ )) + (coste de la batería motocicleta superior 125cc\* $\text{"Porcentaje población de motocicletas } <250\text{cc"}$ ))/Porcentaje de población de motocicletas estudiadas  
Units: Eur

coste de la batería motocicleta inferior 125cc= capacidad de la batería de la motocicleta eléctrica inferior 125cc\*curva descenso precio kwh(Time)  
Units: Eur

coste de la batería motocicleta superior 125cc= capacidad de la batería de la motocicleta eléctrica superior 125cc\*curva descenso precio kwh(Time)  
Units: Eur

coste de mantenimiento anual motocicleta convencional= "coste de mantenimiento motocicleta convencional/km"\*kilometros medios anuales recorridos por motocicleta  
Units: Eur/Year

coste de mantenimiento anual motocicleta electrica= "coste de mantenimiento motocicleta electrica/km"\*kilometros medios anuales recorridos por motocicleta  
Units: Eur/Year

"coste de mantenimiento motocicleta convencional/km"= 0.0283  
Units: Eur/km

"coste de mantenimiento motocicleta electrica/km"= 0.015  
Units: Eur/km

coste del cableado y cargador del VE= 480  
Units: Eur

costes anuales motocicleta convencional= coste anual gasolina motocicleta convencional+coste de mantenimiento anual motocicleta convencional  
Units: Eur/Year

costes anuales motocicleta eléctrica= coste anual electricidad motocicleta electrica+coste de mantenimiento anual motocicleta electrica  
Units: Eur/Year

Curva aumento parque motocicletas([(2010,0)-(2020,2)],(2010,1),(2011,1.03),(2012,1.06),(2013,1.09),(2014,1.12),(2015,1.15),(2016,1.18),(2017,1.21),(2018,1.24),(2019,1.27),(2020,1.3))

Units: 1

Curva de preocupacion en funcion de los puntos de recarga ((0,0)-(2,1)],(0,0.71),(1,0.85),(1.5,0.92),(2,1))

Units: Dmnl

Curva de preocupacion por la autonomía de motocicleta eléctrica ((0,0)-(300,10)],(0,0),(40,0.116),(60,0.428),(80,0.673),(120,1),(300,1))

Units: 1

Curva de prevision de puntos de recarga segun el Gobierno extrapolada a 2020 (([2010,0)-(2020,220000)],(2010,1250),(2011,5600),(2012,15350),(2013,34850),(2014,80350),(2015,110000),(2016,130000),(2017,150000),(2018,170000),(2019,190000),(2020,210000))

Units: Puntos de recarga

curva descenso precio kwh([(2010,0)-(2020,600)],(2010,500),(2020,243))

Units: Eur/kwh

curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen([(2010,0)-(2020,1)],(2010,0.7507),(2011,0.7648),(2012,0.7972),(2013,0.8296),(2014,0.856),(2015,0.8745),(2016,0.8935),(2017,0.9088),(2018,0.9251),(2019,0.9356),(2020,0.9449))

Units: Eur/l

Demanda de motocicletas electricas= compradores potenciales de motocicleta electrica debido a características limitadoras\*ratio de atractivo motocicleta electrica

Units: motocicletas

demanda inicial de motocicletas electricas= 0

Units: motocicletas

Desplazamientos por ciudad= 0.89

Units: 1

Disponibilidad de garaje privado= 0.77

Units: Dmnl

Disponibilidad del cliente a pagar más por la motocicleta eléctrica([(1,0)-(5,1)],(1,1),(1.1,0.613),(1.2,0.239),(1.3,0.067),(1.4,0.031),(2,0),(5,0))

Units: 1

entrega al cliente motocicleta= Motocicletas eléctricas demandadas/tiempo de fabricacion motocicleta eléctrica

Units: motocicletas/Year

Gasto del Gobierno en subvenciones a la compra= INTEG (gasto al año en subvenciones a la compra,0)

Units: Eur

kilometros medios anuales recorridos por motocicleta= 9000

Units: km/Year

mejora efectiva de la batería motocicleta eléctrica inferior 125cc= capacidad de la batería de la motocicleta eléctrica inferior 125cc\*porcentaje de mejora de autonomía anual

Units: kwh/Year

mejora efectiva de la batería motocicleta eléctrica superior 125cc= capacidad de la batería de la motocicleta eléctrica superior 125cc\*porcentaje de mejora de autonomía anual

Units: kwh/Year

Motocicletas eléctricas demandadas= INTEG (Motocicletas eléctricas deseadas-entrega al cliente motocicleta,demanda inicial de motocicletas electricas)

Units: motocicletas

Motocicletas eléctricas deseadas= Demanda de motocicletas electricas

Units: motocicletas/Year

Motocicletas eléctricas en funcionamiento= INTEG (entrega al cliente motocicleta-reemplazamiento de motocicleta,motos electricas en funcionamiento iniciales)

Units: motocicletas

motos electricas en funcionamiento iniciales= 0

Units: motocicletas

Parque de motocicletas= Parque de motocicletas 2010\*Curva aumento parque motocicletas(Time)

Units: motocicletas

Parque de motocicletas 2010= 2.70748e+006

Units: motocicletas

Población que aparca la motocicleta en garaje= ("Porcentaje población de motocicletas <75cc"+"Porcentaje población de motocicletas <125cc")\*Porcentaje de usuarios de garaje con motocicletas inferior 125cc+("Porcentaje población de motocicletas <250cc"\*Porcentaje de usuarios de garaje con motocicletas superior125cc)

Units: 1

porcentaje de mejora de autonomía anual= 0.02

Units: Dmnl/Year

Porcentaje de parque potencial para motocicleta eléctrica según cilindrada = Parque de motocicletas\*Porcentaje de población de motocicletas estudiadas

Units: motocicletas

Porcentaje de población de motocicletas estudiadas= "Porcentaje población de motocicletas <75cc"+"Porcentaje población de motocicletas <125cc"+"Porcentaje población de motocicletas <250cc"

Units: 1

Porcentaje de usuarios de garaje con motocicletas inferior 125cc= 0.505

Units: 1

Porcentaje de usuarios de garaje con motocicletas superior125cc= 0.802

Units: 1

"Porcentaje población de motocicletas <125cc"= 0.33

Units: 1

"Porcentaje población de motocicletas <250cc"= 0.22

Units: 1

"Porcentaje población de motocicletas <75cc"= 0.07

Units: 1

posibles compradores de motocicletas contactados por año= Motocicletas eléctricas en funcionamiento\*contactos por el boca a boca al año/Porcentaje de parque potencial para motocicleta eléctrica según cilindrada

Units: 1/Year

precio de la electricidad= (porcentaje de usuarios a utilizar horario nocturno\*coste de la electricidad en horario nocturno\*aumento del precio de la tarifa nocturna(Time))+(coste de la electricidad en horario normal(Time)\*(1-porcentaje de usuarios a utilizar horario nocturno))

Units: Eur/kwh

precio de litro de combustible al consumidor= (precio litro de petroleo antes de impuestos+Impuestos indirectos medios)\*(1+IVA(Time))\*(1+Incremento del precio por margen de gasolineras y transportes)

Units: Eur/l

Precio medio motocicleta convencional= (("Porcentaje población de motocicletas <75cc"\*Precio medio motocicleta convencional cilindrada <75cc))+("Porcentaje población de motocicletas <125cc"\*Precio medio motocicleta convencional cilindrada <125cc))+("Porcentaje población de motocicletas <250cc"\*Precio medio motocicleta convencional cilindrada <250cc"))/Porcentaje de población de motocicletas estudiadas

Units: Eur

"Precio medio motocicleta convencional cilindrada <125cc"= 4300

Units: Eur

"Precio medio motocicleta convencional cilindrada <250cc"= 6000

Units: Eur

"Precio medio motocicleta convencional cilindrada <75cc"= 2500

Units: Eur

Precio medio motocicleta eléctrica= Precio medio motocicleta convencional + controlador del motor eléctrico(Time)+"convertidor AC/DC"+"convertidor DC/DC"+sistemas asociados a la batería en motocicletas+bus alta tensión motocicleta+coste de la batería en motocicleta eléctrica medio+coste del cableado y cargador del VE-IF THEN ELSE(Gasto del Gobierno en subvenciones a la compra<Presupuesto del IDAE para adquisición de VE, valor de la subvencion a la compra de motocicleta electrica(Time),0)

Units: Eur

Presupuesto del IDAE para adquisición de VE= 2.48e+008

Units: Eur

Proporcion puntos de recarga en funcion de motocicletas electricas= IF THEN ELSE(Motocicletas eléctricas en funcionamiento>0,Curva de prevision de puntos de recarga segun el Gobierno extrapolada a 2020(Time)/Motocicletas eléctricas en funcionamiento,0)

Units: 1

Ratio amortizacion motocicleta electrica vs motocicleta convencional=IF THEN ELSE((Precio medio motocicleta eléctrica+coste de mantenimiento anual motocicleta electrica+coste anual electricidad motocicleta electrica)<=(Precio medio motocicleta convencional +coste de mantenimiento anual motocicleta convencional+(constante calculo rentabilidad motocicletas\*curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time))),1 , IF THEN ELSE((Precio medio motocicleta eléctrica+coste de mantenimiento anual motocicleta electrica\*2+coste anual electricidad motocicleta electrica\*2.02)<=(Precio medio motocicleta convencional+coste de mantenimiento anual motocicleta convencional\*2+(constante calculo rentabilidad motocicletas\*(curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+1)))), 2, IF THEN ELSE((Precio medio motocicleta eléctrica+coste de mantenimiento anual motocicleta electrica\*3+coste anual electricidad motocicleta electrica\*3.04)<=(Precio medio motocicleta convencional+coste de mantenimiento anual motocicleta convencional\*3+(constante calculo rentabilidad motocicletas\*(curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen (Time)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+1)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+2)))), 3, IF THEN ELSE((Precio medio motocicleta eléctrica+coste de mantenimiento anual motocicleta electrica\*4+coste anual electricidad motocicleta electrica\*4.06)<=(Precio medio motocicleta convencional+coste de mantenimiento anual motocicleta convencional\*4+(constante calculo rentabilidad motocicletas\*(curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen (Time)+curvaevolucion precio gasolina sin IVA ni margen (Time+1)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen (Time+2)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+3)))), 4, IF THEN ELSE((Precio medio motocicleta eléctrica+coste de mantenimiento anual motocicleta electrica\*5+coste anual electricidad motocicleta electrica\*5.08)<=(Precio medio motocicleta convencional+coste de mantenimiento anual motocicleta convencional\*5+(constante calculo rentabilidad motocicletas\*(curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+1)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+2)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+3)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+4))))), 5

2)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+3)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen (Time+4))))), 5, IF THEN ELSE((Precio medio motocicleta eléctrica+coste de mantenimiento anual motocicleta electrica\*6+coste anual electricidad motocicleta electrica\*6.1)<=(Precio medio motocicleta convencional+coste de mantenimiento anual motocicleta convencional\*6+(constante calculo rentabilidad motocicletas\*(curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+1)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+2)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+3)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+4)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+5))))), 6, IF THEN ELSE((Precio medio motocicleta eléctrica+coste de mantenimiento anual motocicleta electrica\*7+coste anual electricidad motocicleta electrica\*7.12)<=(Precio medio motocicleta convencional+coste de mantenimiento anual motocicleta convencional\*7+(constante calculo rentabilidad motocicletas\*(curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+1)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+2)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+3)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+4)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+5)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+6))))), 7, IF THEN ELSE((Precio medio motocicleta eléctrica+coste de mantenimiento anual motocicleta electrica\*8+coste anual electricidad motocicleta electrica\*8.14)<=(Precio medio motocicleta convencional+coste de mantenimiento anual motocicleta convencional\*8+(constante calculo rentabilidad motocicletas\*(curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+1)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+2)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+3)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+4)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+5)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+6)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+7))))), 8, IF THEN ELSE((Precio medio motocicleta eléctrica+coste de mantenimiento anual motocicleta electrica\*9+coste anual electricidad motocicleta electrica\*9.16)<=(Precio medio motocicleta convencional+coste de mantenimiento anual motocicleta convencional\*9+(constante calculo rentabilidad motocicletas\*(curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+1)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+2)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+3)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+4)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+5)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+6)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+7)+curva evolucion precio gasolina sin IVA ni margen(Time+8))))), 9, 10)))))))))

Units: 1

ratio de atractivo motocicleta electrica=(atractivo boca a boca moto electrica+atractivo de motocicleta eléctrica)\*renovacion parque motocicletas

Units: motocicletas/Year

ratio preocupacion por la autonomia de la motocicleta electrica=Curva de preocupacion por la autonomía de motocicleta electrica(autonomia bateria motocicleta eléctrica media)

Units: Dmnl

Recorridos diarios con autonomía suficiente= 0.783

Units: 1

reemplazamiento de motocicleta= Motocicletas eléctricas en funcionamiento\*renovacion parque motocicletas

Units: motocicletas/Year

renovacion parque motocicletas= 1/años en renovar el parque de motocicletas

Units: 1/Year

sistemas asociados a la batería en motocicletas= 553 + 10.6\*capacidad de la batería de motocicleta media

Units: Eur

tiempo de fabricacion motocicleta eléctrica= 0.17

Units: Year

valor de la subvencion a la compra de motocicleta electrica([(2010,0)-(2020,2000)],(2010,1200),(2011,1200),(2012,1200),(2013,1200),(2014,1200),(2015,1200),(2016,1200),(2017,1200),(2018,1200),(2019,1200),(2020,1200))

Units: Eur

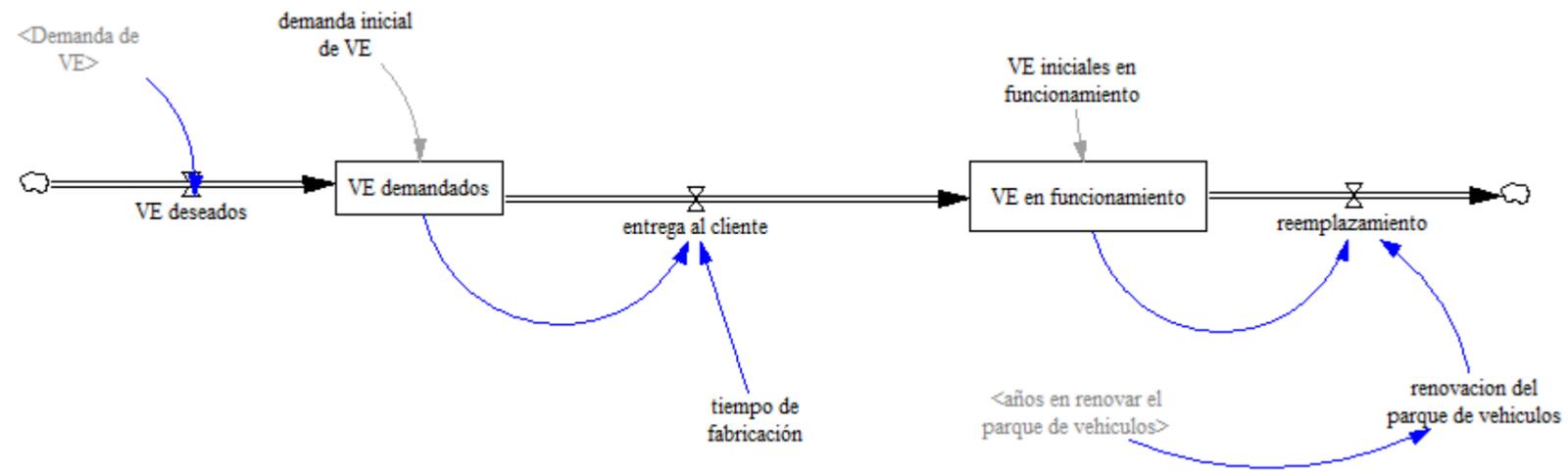
## **Capítulo 12**

# **Anexo II: Diagramas del modelo**

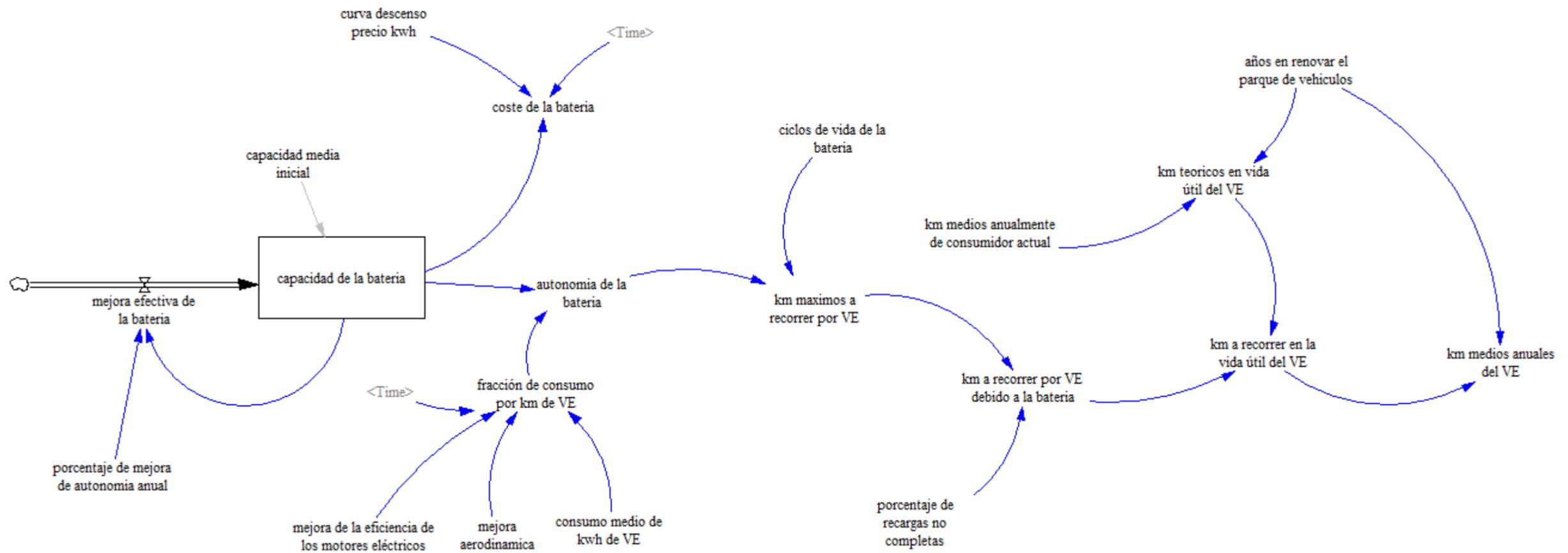
En este anexo se van a poder localizar todos los diagramas del modelo de Vensim que debido a su tamaño no se han podido incluir en los capítulos anteriores.



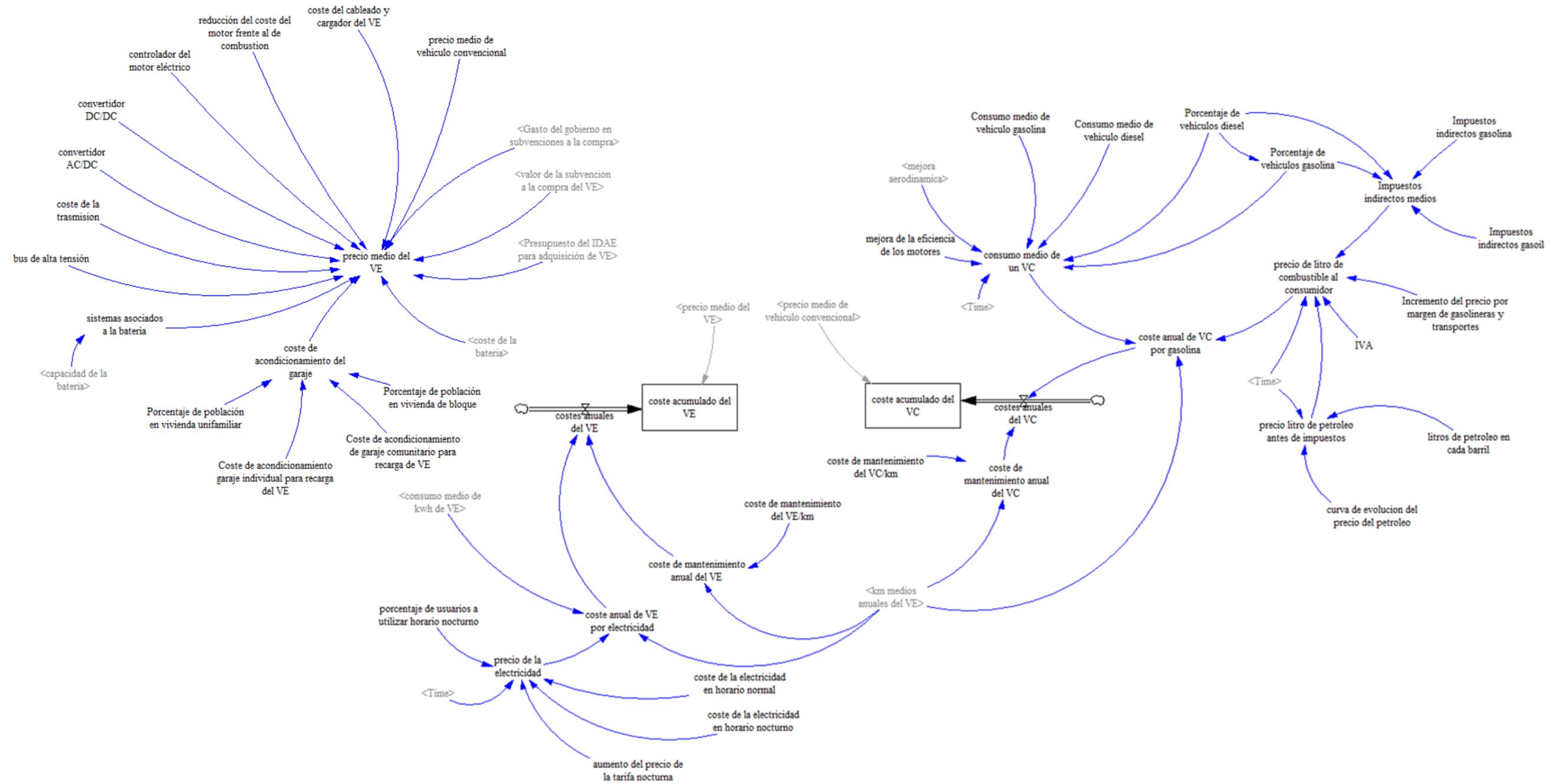
### Bloque de fabricación del vehículo eléctrico



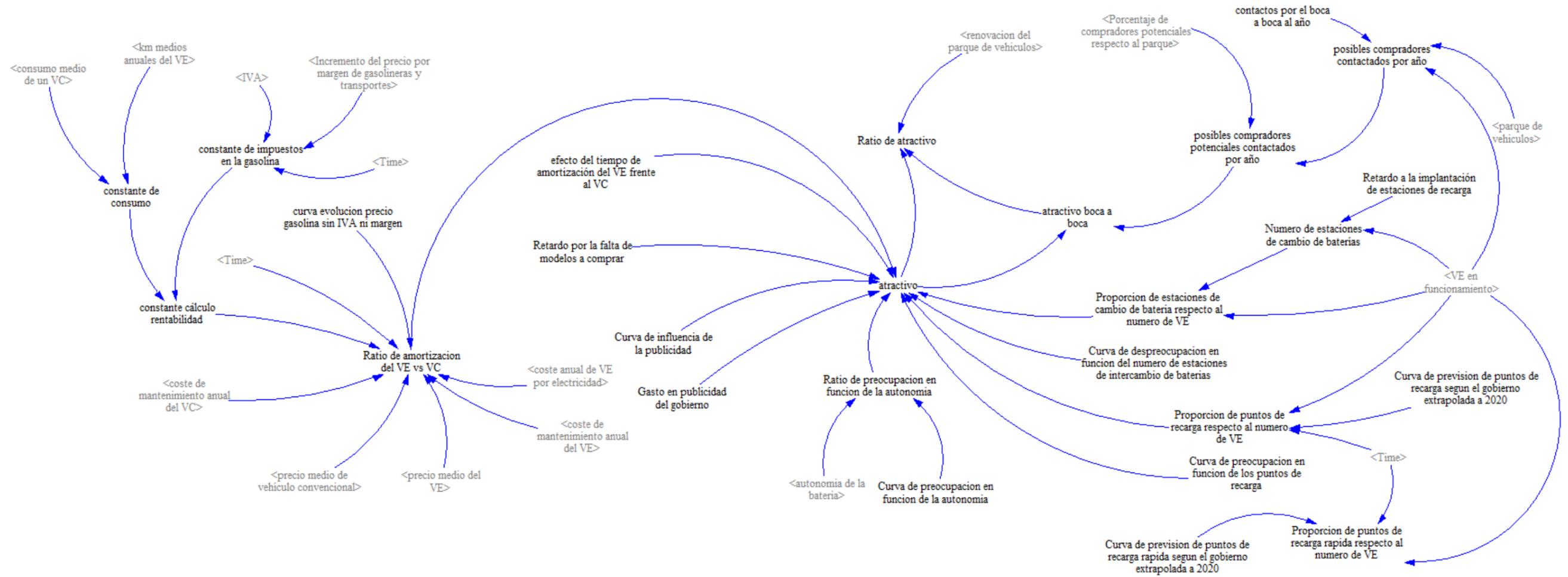
### Bloque de evolución de las tecnologías



### Bloque de coste del vehículo eléctrico

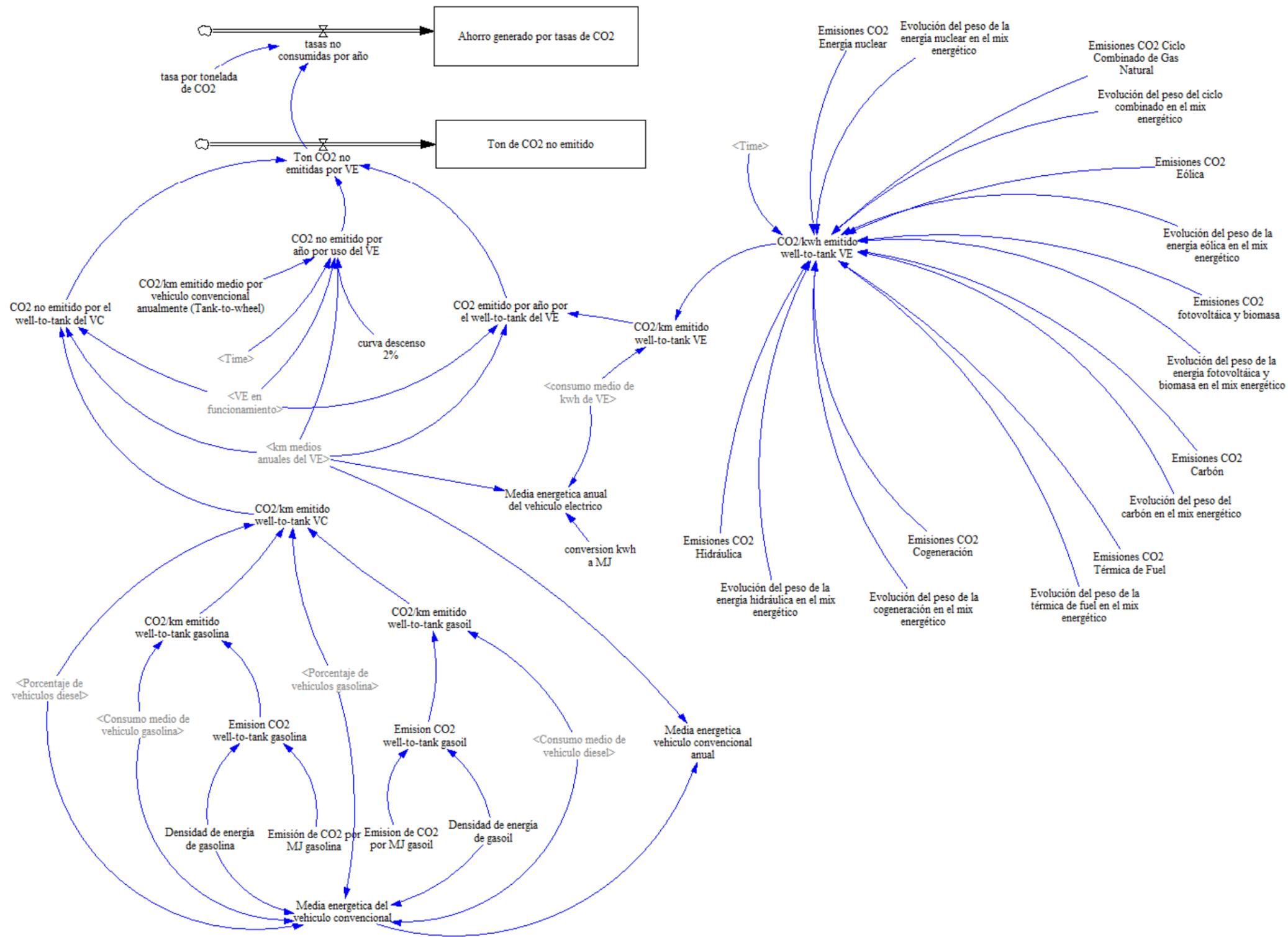


**Bloque del atractivo del vehículo eléctrico**

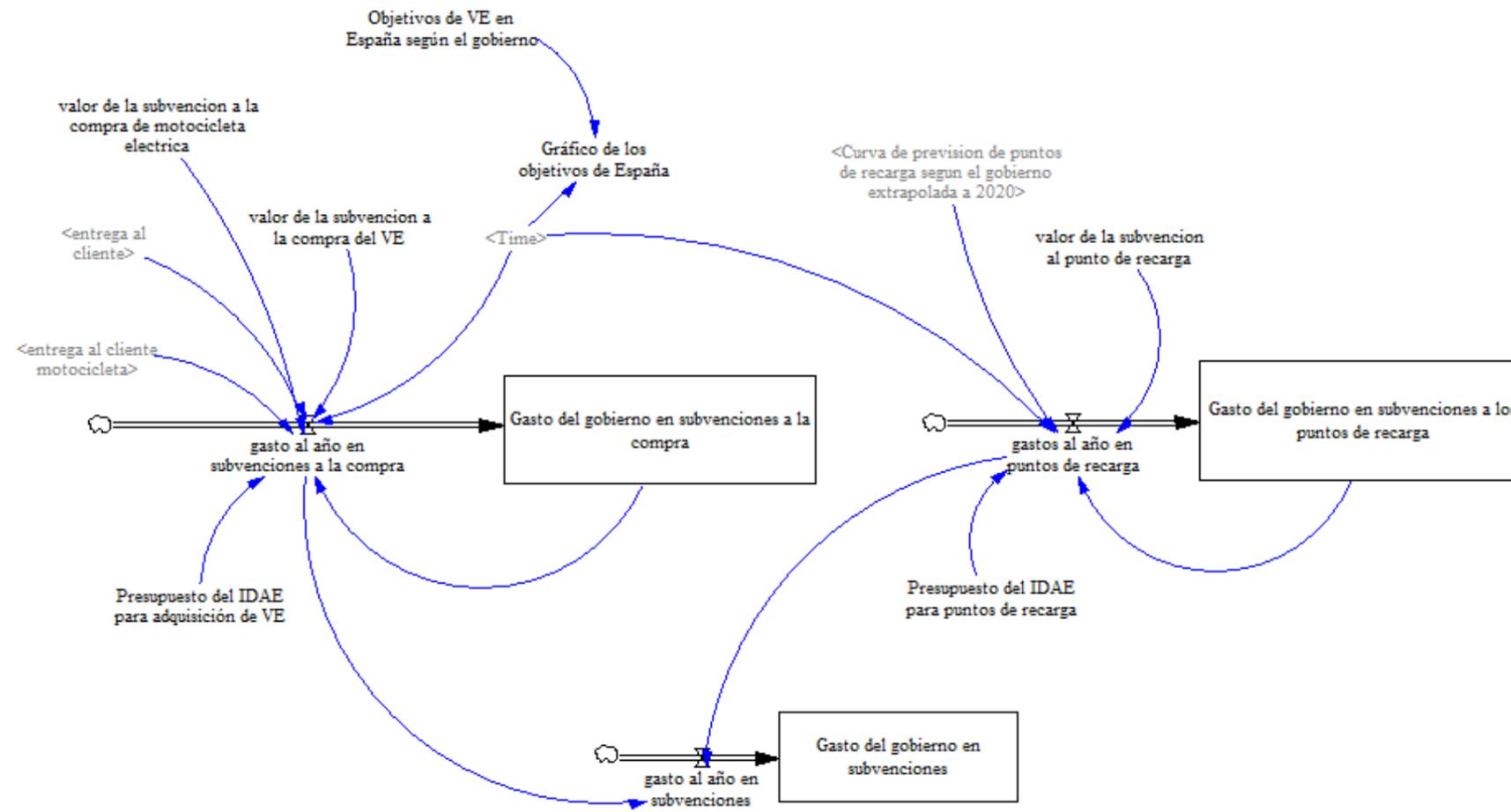




**Bloque del medio ambiente**



**Bloque de decisiones del Gobierno**



### Modelo de la motocicleta eléctrica

