UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIEROS DE MINAS Y ENERGÍA**

**METODOLOGÍA PARA LA
INTRODUCCIÓN PROGRESIVA DEL
HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE
ALTERNATIVO EN EL TRANSPORTE
PRIVADO. APLICACIÓN AL CASO
ESPAÑOL.**

TESIS DOCTORAL

CARLOS FÚNEZ GUERRA

Ingeniero de Minas

Madrid, 2016

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIEROS DE MINAS Y ENERGÍA**

**METODOLOGÍA PARA LA
INTRODUCCIÓN PROGRESIVA DEL
HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE
ALTERNATIVO EN EL TRANSPORTE
PRIVADO. APLICACIÓN AL CASO
ESPAÑOL.**

Autor:

CARLOS FÚNEZ GUERRA

Ingeniero de Minas

Directora:

MARÍA DEL CARMEN CLEMENTE JUL

Dra en Ciencias Químicas

Madrid, 2016

Dentro de veinte años lamentarás más las cosas que no hiciste, que las que hiciste.

Así que suelta amarras y abandona puerto seguro. Atrapa el viento en tus velas, sueña, explora, descubre.

MARK TWAIN

Dedicatoria

Hija, eres mi orgullo y mi gran motivación, libras mi mente de todas las adversidades que se presentan, y me impulsas cada día a superarme en la carrera de ofrecerte siempre lo mejor. No es fácil, eso lo sé, pero tal vez si no te tuviera, no habría logrado tantas grandes cosas.

Muchas gracias hija, porque sin tu ayuda, no habría logrado desarrollar con éxito, mi tesis doctoral.

Agradecimientos

A mi hija Claudia, por ser la mejor hija de todas, y por hacer de mí, el padre más feliz de este mundo. Tu afecto y tu cariño son los detonantes de mi felicidad, de mi esfuerzo, de mis ganas de buscar lo mejor para ti. Aún a tu corta edad, me has enseñado y me sigues enseñando muchas cosas de esta vida.

A mi mujer, el amor de mi vida, gracias por tu paciencia, por tu comprensión, por tu dedicación, por tu fuerza, por tu amor y por ser tal y como eres. En realidad me llenas por dentro de muchas fuerzas para conseguir el equilibrio que me permita dar el máximo de mí.

A mis padres y hermanos, por ser el pilar fundamental de todo lo que soy, toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo.

A mi directora de tesis, María del Carmen Clemente Jul, por tu generosidad al brindarme la oportunidad de recurrir a tu capacidad y experiencia científica en un marco de confianza, afecto y amistad, fundamentales para la concreción de este trabajo.

A mis amigos y compañeros, los doctores Ricardo García Ródenas, Doroteo Verastegui Rayo y Eusebio Angulo Sánchez Herrera, por la inestimable ayuda que me han brindado, sin la cual, no hubiese sido posible la realización de esta tesis doctoral.

A mis directores del Centro Nacional del Hidrógeno, Manuel Montes Ponce de León, María Jaén Caparrós y Lourdes Rodríguez Mayor, quienes siempre me mostraron su apoyo incondicional y me ayudaron en todo lo que necesité para poder desarrollar esta tesis doctoral.

A mis colegas de la Universidad Central de Chile, en especial a Lorenzo Reyes Bozo y a Héctor Valdés González, con los que he tenido la posibilidad de compartir muy buenos momentos, de los que he aprendido mucho y me han hecho sentir como en casa durante mi estancia predoctoral en Chile.

A todos aquellos familiares y amigos que no recordé al momento de escribir esto. Vosotros sabéis quiénes sois.

METHODOLOGY FOR PROGRESSIVE INTRODUCTION OF HYDROGEN AS ALTERNATIVE FUEL IN PRIVATE TRANSPORT. APPLICATION TO THE SPANISH CASE.

Spanish mobility and transport have a strong dependence on imported oil. Oil supply and therefore mobility depend on politically unstable regions, raising concerns about security of supply. The impact of oil dependency in the Spanish economy is very important, being necessary to act to end this situation. The development of a strategy in the transport sector, replacing gradually to oil by alternative fuels and create the necessary infrastructure, could generate savings in the bill for oil imports, while greater security of supply and reduced greenhouse gases.

We understand as alternative fuels, fuel or energy sources that replace, at least in part, to classic fossil fuels as a source of energy in transport and can contribute to the decarbonisation of the latter and to improve the environmental performance of the transport sector. Among the different alternative fuels, this thesis focuses on hydrogen.

2014/94 / EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL DIRECTIVE of 22 October 2014 on the implementation of an infrastructure for alternative fuels, establishes a common framework of measures for the implementation of an infrastructure for alternative fuels in the EU European to minimize the dependence of transport on oil and mitigate the environmental impact of transport. The Directive establishes minimum requirements for the creation of an infrastructure for alternative fuels, including charging points for electric vehicles and refuelling points natural gas (liquefied and compressed) and hydrogen, to be applied by the national policy frameworks Member States as well as by the common technical specifications on these charging points and refuelling, and reporting requirements to users.

In this thesis, it provides answers to Directive 2014/94 / EU, in terms of developing a national action framework for hydrogen as an alternative fuel, by developing a methodology to determine the number of hydrogen refuelling stations and exact location, every time t , where t is equal to one year. Besides the subsidy policy is defined, optimizing the investment that the state has to perform, to make hydrogen as an alternative fuel is introduced, having to develop gradually, according to the needs and sustainable over time after the end of the subsidy period.

To design the optimal policy subsidies, a model Stackelberg equilibrium is established, allowing penetration of hydrogen as an alternative fuel. The Spanish State plays the role of *leader* and owners of filling stations that can potentially accommodate hydrogen as an alternative fuel, are the *followers*. The leader wants to design the subsidy policy that minimizes the investment required for the effective deployment of the infrastructure and owners of potential refuelling stations, which may include hydrogen as fuel, dynamically decide to implement or not (variables lower level) the alternative fuel hydrogen, based on estimates of

return on their investment based on current subsidy policies and the demand for alternative fuels.

The model reflects the behaviour of the different actors in the process (Spanish state, station owners refuelling and owners of electric vehicles fuel cell) in a dynamic context and competition between refuelling stations. The aspect of competition is new in the literature, since in most works a coordinated location is assumed, that is, a monopoly on the ownership of refuelling stations for alternative fuels or, equivalently, the existence of a state you can force any individual owner to install a alternative fuel refuelling station, the aim being to maximize the benefit of the company or sole proprietor maximize overall network coverage.

The model or methodology discussed above, is applied to a case study consists of five nodes and arcs 6 and a projection for all of Spain. In addition, a sensitivity analysis including addition to the initial considered subsidies (aid for amortization of refuelling infrastructure and kilograms of hydrogen sold), a subsidy for the purchase of fuel cell electric vehicles, considering the subsidy for the case study and performed projection to the entire Spanish territory, thereby adding a total of 4 scenarios. The study period considered is 30 years, between 2016 and 2045, being the dynamic study, ie, different parameters evolve over time, in particular, for each time t , whereas t is equal to one year.

The main result of applying the methodology proposed in this thesis to the four scenarios, is the technical and economic feasibility of the introduction of hydrogen as an alternative fuel (in an orderly and sustainable manner over time), needing to do so subsidies moderate, representing values between 0.18% and 1.56% annual average budget of the Spanish government spends annually infrastructure.

METODOLOGÍA PARA LA INTRODUCCIÓN PROGRESIVA DEL HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN EL TRANSPORTE PRIVADO. APLICACIÓN AL CASO ESPAÑOL.

La movilidad y el transporte Español, dependen enormemente del petróleo importado. El suministro de petróleo y, por tanto, la movilidad dependen en gran medida de regiones políticamente inestables, circunstancia que suscita preocupaciones sobre la seguridad del suministro. La repercusión de la dependencia del petróleo en la economía Española es demasiado grande para ignorarla, teniendo que actuar para poner fin a esta situación. Desarrollar una estrategia en el sector del transporte, que sustituya progresivamente al petróleo por combustibles alternativos y cree las infraestructuras necesarias, podría suponer ahorros en la factura de las importaciones de petróleo, a la vez que una mayor seguridad de suministro y reducción de los gases de efecto invernadero.

Como combustibles alternativos entendemos los combustibles o fuentes de energía que sustituyen, al menos en parte, a los combustibles fósiles clásicos como fuente de energía en los transportes y que pueden contribuir a la descarbonización de estos últimos y a mejorar el comportamiento medioambiental del sector transporte. Dentro de los diferentes combustibles alternativos, la presente tesis doctoral se centra en el hidrógeno.

La **DIRECTIVA 2014/94/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 22 de octubre de 2014 relativa a la implantación de una infraestructura para los combustibles alternativos**, establece un marco común de medidas para la implantación de una infraestructura para los combustibles alternativos en la Unión Europea, a fin de minimizar la dependencia de los transportes respecto del petróleo y mitigar el impacto medioambiental del transporte. Dicha Directiva establece requisitos mínimos para la creación de una infraestructura para los combustibles alternativos, incluyendo puntos de recarga para vehículos eléctricos y puntos de repostaje de gas natural (licuado y comprimido) y de hidrógeno, que se habrán de aplicar mediante los marcos de acción nacionales de los Estados miembros, así como mediante las especificaciones técnicas comunes sobre dichos puntos de recarga y de repostaje, y los requisitos de información a los usuarios.

En la presente tesis doctoral, se pretende dar respuesta a lo planteado por la Directiva 2014/94/UE, en lo referente a desarrollar un marco de acción nacional para el hidrógeno como combustible alternativo, mediante el desarrollo una metodología que permita determinar el número de infraestructuras de repostaje que han de incluir hidrógeno como combustible alternativo y su localización exacta, en cada periodo de tiempo t , considerando que la duración del periodo es de un año. Adicionalmente se define la política de subsidios y se optimiza la inversión que el Estado ha de realizar, en concepto de subsidio, para conseguir que se introduzca el hidrógeno como combustible alternativo, teniendo que desarrollarse de forma paulatina, acorde a las necesidades y sostenible en el tiempo una vez que finalice el periodo de subsidios.

Para diseñar la política de subsidios óptima, comentada anteriormente, se establece un modelo de equilibrio de Stackelberg, de forma que se favorezca la penetración en el mercado de la movilidad sostenible de las infraestructuras que incorporan el hidrógeno como combustible alternativo. El Estado Español desempeña el papel de *líder* y los propietarios de las estaciones de repostaje, que potencialmente pueden albergar el hidrógeno como combustible alternativo, son los *seguidores*. El líder desea diseñar la política de subsidios que minimice la inversión necesaria para el despliegue efectivo de la infraestructura y los propietarios de las potenciales estaciones de repostaje, que pueden incluir al hidrógeno como combustible, deciden dinámicamente implementar o no (variables del nivel inferior) el hidrógeno con combustible alternativo, en función de las estimaciones del beneficio de su inversión basada en las actuales políticas de subsidios y en la demanda de combustibles alternativos.

El modelo recoge el comportamiento de los diferentes actores del proceso (Estado Español, propietarios de estaciones de repostaje de combustible y propietarios de los vehículos eléctricos de pila de combustible) en un contexto dinámico y de competencia entre las estaciones de repostaje. El aspecto de competencia es novedoso en la literatura, ya que en la mayoría de los trabajos se asume una localización coordinada, esto es, un monopolio en la propiedad de las estaciones de repostaje de combustibles alternativos o, equivalentemente, la existencia de un Estado que puede forzar a cualquier propietario individual a instalar una estación de repostaje de combustible alternativo; siendo el objetivo el de maximizar el beneficio de la única compañía propietaria o maximizar la cobertura global de la red.

El modelo o metodología, comentado anteriormente, se aplica a un caso de estudio formado por 5 nodos y 6 arcos. Con los resultados obtenidos, se realiza la proyección para el caso de España. Adicionalmente, se realiza un análisis de sensibilidad, incluyendo además de los subsidios base que considera la metodología (ayudas a la amortización de la infraestructura de repostaje y a los kilogramos de hidrógeno vendidos), un subsidio a la adquisición de vehículos eléctricos de pila de combustible alimentados por hidrógeno, y se considera dicho subsidio para el caso de estudio y su proyección al caso Español, sumando de esta forma un total de 4 escenarios. El periodo de estudio considerado es de 30 años, comprendido entre el año 2016 y el año 2045, siendo el estudio dinámico, es decir, los diferentes parámetros evolucionan con el tiempo, en concreto, para cada periodo de tiempo t , considerando que t es igual a un año.

El principal resultado obtenido al aplicar la metodología planteada en la presente tesis doctoral a los cuatro escenarios, es la factibilidad técnico-económica de la introducción del hidrógeno como combustible alternativo (de forma ordenada y sostenible en el tiempo), necesitando para ello subsidios moderados, representando valores comprendidos entre el 0,18% y el 1,56% anual del presupuesto medio que el Gobierno Español dedica anualmente a infraestructuras.

Índice general

1. Introducción	4
1.1. Movilidad sostenible	4
1.1.1. El estudio CARS 21	6
1.1.2. Situación actual de la industria del automóvil en España . .	7
1.1.3. Situación actual de la industria del automóvil en Europa . .	8
1.1.4. Plan de acción de la Unión Europea	9
1.1.5. Mejorar las condiciones de mercado	12
1.1.6. Mejora de la competitividad en los mercados globales	13
1.1.7. Anticipar la adaptación y gestionar la reestructuración . . .	13
1.1.8. Seguimiento del plan de acción.	14
1.2. Vehículos alimentados por combustibles alternativos	15
1.2.1. Vehículo eléctrico de pila de combustible (Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV)	16
1.2.2. Vehículo eléctrico (Full Battery Electric Vehicle, BEV)	20
1.2.3. Vehículo de gas natural comprimido (Compressed Natural Gas Vehicle, NGV)	21
1.3. Motivación	24
1.3.1. Necesidad de reducir la dependencia de combustibles fósiles	25
1.3.2. Utilización de combustibles alternativos	25
1.3.3. Necesidad de crear una estrategia relativa a los combustibles alternativos	26
1.3.4. La Directiva 2014/94/UE	27
1.3.5. Problemática a resolver con el desarrollo de la tesis doctoral	29
1.4. Objetivos	29
1.5. Sumario de la Tesis Doctoral	32
2. Estado del arte	35
2.1. Revisión bibliográfica	35
2.2. Aportaciones de la tesis doctoral	50
3. Descripción de la metodología	53
3.1. Introducción	53
3.2. Modelización del tráfico	58
3.3. Modelización del comportamiento de los usuarios de vehículos . . .	60
3.4. Modelización de la cobertura	63
3.5. Modelización del comportamiento de los propietarios de las estaciones de repostaje (variable x)	64
3.5.1. Estimación del número de FCEV que repostan en cada hidrogenera	65
3.5.2. Estimación del beneficio de la infraestructura de repostaje de hidrógeno	65
3.5.3. Modelización del comportamiento de las infraestructuras de repostaje de hidrógeno (variable x)	66
3.5.4. Modelización de los incentivos o subsidios	67
3.6. Modelo de de localización	68

3.7. Resolución del algoritmo	68
4. Validación de la metodología propuesta. Casos de estudio	71
4.1. Introducción	71
4.2. Modelización del tráfico	72
4.3. Modelización del comportamiento de los usuarios de vehículos . . .	75
4.4. Modelización de la cobertura	78
4.5. Modelización del comportamiento de los propietarios de las estacio- nes de repostaje	81
5. Resultados y discusión	86
5.1. Número y capacidad de las hidrogeneras	88
5.2. Localización exacta de las hidrogeneras	90
5.3. Número de FCEV	92
5.4. t de H_2 suministrados por las hidrogeneras	94
5.5. km recorridos por los FCEV	95
5.6. Energía renovable necesaria para generar los kg de H_2	96
5.7. t de CO_2 ahorradas por uso de H_2	98
5.8. Combustible fósil ahorrado, en m^3 , por uso de H_2	100
5.9. Subsidio para amortizar la inversión de la hidrogenera, ψ^t	102
5.10 Subsidio al kg H_2 vendidos, ϕ^t	104
5.11 Subsidio a la adquisición de FCEV	106
5.12 Subsidios totales	108
5.13 Beneficios económicos menores emisiones CO_2	111
5.14 Capacidad de suministro de H_2 de las hidrogeneras	114
5.15 Comparación de los resultados obtenidos con los planes de movili- dad de los principales países europeos	116
5.16 Cuantificación económica para la introducción del H_2 como com- bustible alternativo	118
6. Conclusiones	124
7. Conclusions	126
8. Líneas de investigación futuras	128
9. Publicaciones de la tesis realizadas por el doctorando	132

Índice de figuras

1.1. Densidad de energía de diferentes combustibles por unidad de masa.	15
1.2. Densidad de energía de diferentes combustibles por unidad de volumen.	16
1.3. Especificaciones técnicas Hyundai IX35.	19
1.4. Esquema de principio Toyota Mirai.	20
1.5. Especificaciones técnicas tipos vehículos eléctricos.	22
1.6. Turismos y vehículos comerciales ligeros.	24
1.7. Red de estudio planteada.	31
1.8. Red Transeuropea de Transporte en España.	32
3.1. Representación simplificada de los elementos que forman parte del proceso de la oferta, la demanda y el mercado de los combustibles alternativos.	55
3.2. Modelo logit anidado para la toma de decisión en la compra de vehículos.	60
3.3. Modelo de localización. Equilibrio de Stackelberg.	69
3.4. Esquema resolución metodología.	70
4.1. Tráfico, parque y consumo de petróleo por modo y tipo de combustible, España, año 2004.	74
4.2. Tráfico, parque y consumo de petróleo por modo y tipo de combustible, España, año 2004.	74
4.3. Multiplicador $\phi(\Delta GDP)$ para las ventas y previsión de ventas de vehículos en España.	76
4.4. Previsión del valor de los atributos de los diferentes tipos de vehículos entre los años 2016 y 2045, (s^t).	77
4.5. Procedimiento de análisis de las estaciones de repostaje de combustible que potencialmente pueden albergar hidrógeno como combustible alternativo.	79
4.6. Valores de N_j y N_a para el grafo de estudio.	80
4.7. Valores de s_i^t inicialmente introducidos al modelo.	83
4.8. Prospectiva de precio de venta de hidrógeno γ^t para cada periodo de tiempo t	83
5.1. N° estaciones de repostaje que incluyen hidrógeno en cada periodo de tiempo t y N° estaciones de repostaje que incluyen hidrógeno acumuladas periodo de estudio. (a) Sin subsidio compra FCEV grafo estudio (b) Con subsidio compra FCEV grafo estudio (c) Sin subsidio compra FCEV prospectiva España (d) Con subsidio compra FCEV prospectiva España.	88
5.2. Localización de las hidrogeneras en los diferentes periodos de tiempo t , sin considerar subvención a la adquisición de FCEV.	90
5.3. Localización de las hidrogeneras en los diferentes periodos de tiempo t , considerando subvención a la adquisición de FCEV.	91

5.4. N° FCEV en cada periodo de tiempo t y N° FCEV acumulados en el periodo de estudio. (a) Sin subsidio compra FCEV grafo estudio (b) Con subsidio compra FCEV grafo estudio (c) Sin subsidio compra FCEV prospectiva España (d) Con subsidio compra FCEV prospectiva España.	92
5.5. % FCEV vs matriculaciones en cada periodo de tiempo t y % FCEV acumulados vs matriculaciones totales periodo de estudio. (a) Sin subsidio compra FCEV (b) Con subsidio compra FCEV.	93
5.6. $t H_2$ en cada periodo de tiempo t y $t H_2$ acumuladas periodo de estudio. (a) Sin subsidio compra FCEV grafo estudio (b) Con subsidio compra FCEV grafo estudio (c) Sin subsidio compra FCEV prospectiva España (d) Con subsidio compra FCEV prospectiva España. . .	94
5.7. GWh energía renovable excedentaria para generación de H_2 en cada periodo de tiempo t y en el periodo de estudio. (a) Sin subsidio compra FCEV grafo estudio (b) Con subsidio compra FCEV grafo estudio (c) Sin subsidio compra FCEV prospectiva España (d) Con subsidio compra FCEV prospectiva España.	96
5.8. $t CO_2$ ahorradas como consecuencia del uso del hidrógeno como combustible alternativo en cada periodo de tiempo t y en el periodo de estudio. (a) Sin subsidio compra FCEV grafo estudio (b) Con subsidio compra FCEV grafo estudio (c) Sin subsidio compra FCEV prospectiva España (d) Con subsidio compra FCEV prospectiva España.	98
5.9. m^3 combustible fósil ahorrados como consecuencia del uso del hidrógeno como combustible alternativo en cada periodo de tiempo t y en el periodo de estudio. (a) Sin subsidio compra FCEV grafo estudio (b) Con subsidio compra FCEV grafo estudio (c) Sin subsidio compra FCEV prospectiva España (d) Con subsidio compra FCEV prospectiva España.	100
5.10. Subsidio aportado por el Gobierno Español para amortizar infraestructuras que incluyen hidrógeno como combustible alternativo ψ^t en cada periodo de tiempo t y para cada infraestructura. (a) Sin subsidio compra FCEV grafo estudio (b) Con subsidio compra FCEV grafo estudio.	102
5.11. Recursos económicos, en €, que ha de aportar el Gobierno Español en cada periodo de tiempo t para apoyar la amortización de las infraestructuras que deciden incluir hidrógeno como combustible alternativo. (a) Sin subsidio compra FCEV grafo estudio (b) Con subsidio compra FCEV grafo estudio (c) Sin subsidio compra FCEV prospectiva España (d) Con subsidio compra FCEV prospectiva España.	103
5.12. Subsidio aportado por el Gobierno Español para la venta de kilogramos de hidrógeno a las infraestructuras que incluyen hidrógeno como combustible alternativo ϕ^t en cada periodo de tiempo t para los kilogramos recorridos por los FCEV durante su primer año de vida. (a) Sin subsidio compra FCEV grafo estudio (b) Con subsidio compra FCEV grafo estudio.	104

5.13 Recursos económicos, en €, que ha de aportar el Gobierno Español en cada periodo de tiempo t para apoyar la venta de kilogramos de hidrógeno asociados a los FCEV nuevos que se ponen en circulación cada periodo, del cual se benefician las hidrogeneras. (a) Sin subsidio compra FCEV grafo estudio (b) Con subsidio compra FCEV grafo estudio (c) Sin subsidio compra FCEV prospectiva España (d) Con subsidio compra FCEV prospectiva España.	105
5.14 Subsidio FCEV. (a) Subsidio unitario (€/ud) (b) Comparativa entre precio del FCEV con y sin subsidio (k€/ud).	106
5.15 Subsidio anual y acumulado que el Gobierno Español aporta para la adquisición de FCEV. (a) Caso de estudio (b) Proyección al caso Español.	106
5.16 Subsidios que el Gobierno Español ha de aportar para el caso de estudio sin considerar subsidio a la adquisición de FCEV. (a) Subsidio anual en (€/año) en cada periodo de tiempo t (b) Subsidio acumulado durante el periodo de estudio (€)	108
5.17 Subsidios que el Gobierno Español ha de aportar para el caso de España sin considerar subsidios a la adquisición de FCEV. (a) Subsidio anual en (€/año) en cada periodo de tiempo t (b) Subsidio acumulado durante el periodo de estudio (€)	109
5.18 Subsidios que el Gobierno Español ha de aportar para el caso de estudio considerando subsidio a la adquisición de FCEV. (a) Subsidio anual en (€/año) en cada periodo de tiempo t (b) Subsidio acumulado durante el periodo de estudio (€)	110
5.19 Subsidios que el Gobierno Español ha de aportar para el caso Español considerando subsidios a la adquisición de FCEV. (a) Subsidio anual en (€/año) en cada periodo de tiempo t (b) Subsidio acumulado durante el periodo de estudio (€)	110
5.20 Previsión del coste asociado a las emisiones de CO_2 en €/t CO_2 en cada periodo de tiempo t (a) Coste ambiental (b) Coste social	111
5.21 Ahorro asociado a la reducción de emisiones de CO_2 en €/t CO_2 motivado por el uso de hidrógeno como combustible alternativo para el caso de estudio sin considerar subsidio a los FCEV (a) En cada periodo de tiempo t (b) Acumulado en el periodo de estudio.	112
5.22 Ahorro asociado a la reducción de emisiones de CO_2 en €/t CO_2 motivado por el uso de hidrógeno como combustible alternativo para el caso de España sin considerar subsidio a los FCEV (a) En cada periodo de tiempo t (b) Acumulado en el periodo de estudio.	112
5.23 Ahorro asociado a la reducción de emisiones de CO_2 en €/t CO_2 motivado por el uso de hidrógeno como combustible alternativo para el caso de estudio considerando subsidio a los FCEV (a) En cada periodo de tiempo t (b) Acumulado en el periodo de estudio.	113
5.24 Ahorro asociado a la reducción de emisiones de CO_2 en €/t CO_2 motivado por el uso de hidrógeno como combustible alternativo para el caso de España sin considerar subsidio a los FCEV (a) En cada periodo de tiempo t (b) Acumulado en el periodo de estudio.	113

5.25.Capacidad de las infraestructuras de repostaje de hidrógeno para satisfacer la demanda en cada periodo de tiempo t sin considerar subsidio a los FCEV (a) Para el caso de estudio (b) Para la proyección al caso Español.	114
5.26.Capacidad de las infraestructuras de repostaje de hidrógeno para satisfacer la demanda en cada periodo de tiempo t considerando subsidio a los FCEV (a) Para el caso de estudio (b) Para la proyección al caso Español.	115
5.27.Planes de movilidad mediante hidrógeno de los principales países europeos (Association Francaise pour l Hydrogene et les Piles a Combustible (2015), McKinsey Company (2013), Transnova (2012) y Germany Trade Invest (2013))	116
5.28.Subsidios que el Gobierno Español ha de aportar para la introducción del hidrógeno como combustible alternativo sin considerar subsidio a la venta de FCEV (a1) Costes y ahorros caso estudio (a2) Subsidios del gobierno sin considerar ahorros emisiones CO_2 para el caso de estudio (a3) Subsidios del gobierno considerando ahorros emisiones CO_2 para el caso de estudio (b1) Costes y ahorros caso Español (b2) Subsidios del gobierno sin considerar ahorros emisiones CO_2 para el caso Español (b3) Subsidios del gobierno considerando ahorros emisiones CO_2 para el caso Español.	120
5.29.Subsidios que el Gobierno Español ha de aportar para la introducción del hidrógeno como combustible alternativo considerando subsidio a la venta de FCEV, (a1) Costes y ahorros caso estudio (a2) Subsidios del gobierno sin considerar ahorros emisiones CO_2 para el caso de estudio (a3) Subsidios del gobierno considerando ahorros emisiones CO_2 para el caso de estudio (b1) Costes y ahorros caso Español (b2) Subsidios del gobierno sin considerar ahorros emisiones CO_2 para el caso Español (b3) Subsidios del gobierno considerando ahorros emisiones CO_2 para el caso Español.	121
5.30.Presupuesto en k€ que el Estado Español ha aportado entre los años 1996 y 2016 a industria y energía, infraestructuras e investigación, desarrollo e innovación.	122

Índice de tablas

2.1. Revisión bibliográfica localización estaciones de repostaje de hidrógeno.	50
4.1. Resultado modelo entrópico GAMS, utilizando optimización mediante programación no lineal.	75
4.2. Costes inversión, operación y mantenimiento para hidrogeneras de diferentes capacidades.	84
5.1. Tamaño de las hidrogeneras acumuladas en el periodo de estudio. (a) Sin subsidio compra FCEV grafo estudio (b) Con subsidio compra FCEV grafo estudio (c) Sin subsidio compra FCEV prospectiva España (d) Con subsidio compra FCEV prospectiva España.	89
5.2. Comparativa resultados metodología desarrollada para España, con y sin subsidio a los FCEV, frente al plan de movilidad mediante hidrógeno de Francia.	117
5.3. Indicadores económicos que cuantifican la inversión necesaria que ha de aportar el Gobierno Español para la introducción del hidrógeno como combustible alternativo (CASO1) Caso de estudio y caso Español sin subsidio a la venta de FCEV y sin considerar ahorros potenciales por reducción de emisiones de CO_2 (CASO2) Caso de estudio y caso Español con subsidio a la venta de FCEV y sin considerar ahorros potenciales por reducción de emisiones de CO_2 (CASO 3) Caso de estudio y caso Español sin subsidio a la venta de FCEV y considerando ahorros potenciales por reducción de emisiones de CO_2 (CASO4) Caso de estudio y caso Español con subsidio a la venta de FCEV y considerando ahorros potenciales por reducción de emisiones de CO_2	123

Nomenclatura

En este apartado, se describe la nomenclatura utilizada a lo largo de la presente tesis doctoral.

Índices

- i estación de repostaje que decide incorporar el hidrógeno como combustible alternativo o hidrogena.
- j nodo o ciudad.
- a arco o camino que une dos nodos o dos ciudades.
- t periodo de tiempo.
- t^* último periodo en el que es posible obtener subsidios.
- ω demanda del par origen-destino.
- r ruta o camino mínimo del par origen-destino
- r_ω par origen-destino utilizado para satisfacer la demanda ω

Conjuntos

- V conjunto de nodos que describen las ciudades existentes en el área de estudio.
- A conjunto de carreteras que definen los arcos o caminos mínimos.
- W conjunto de pares origen-destino.
- W^* conjunto de pares origen-destino utilizados para calcular la cobertura de la red.
- S conjunto de vehículos ecológicamente amigables con el medioambiente considerados en el estudio.

Parámetros

- δ_{ia} matriz de incidencia de la estación de repostaje de hidrógeno. Se considera 1 si la estación de repostaje de hidrógeno i esta situada en el arco a .
- $\eta_j(x)$ nivel de cobertura urbana para la ciudad j cuando se han instalado x infraestructuras de repostaje de hidrógeno.
- $d(i, i')$ distancia mínima entre dos infraestructuras de repostaje de hidrógeno i y i' .

- d_ω distancia mínima para recorrer el par origen-destino ω .
- pv_s^t precio de venta de un vehículo tipo s en el periodo de tiempo t , en k€.
- pc_s^t precio de combustible para el vehículo tipo s en el periodo de tiempo t , en €/100 km.
- dr_s^t autonomía en el periodo de tiempo t para un vehículo de tipo s , en km.
- e_s^t emisiones de CO_2 para el vehículo tipo s en el periodo de tiempo t , en gCO_2/km .
- $\bar{g}_j^t$ número total de vehículos vendidos en el periodo de tiempo t en la ciudad j .
- ℓ_ω consumo de combustible (medido en kilogramos de hidrógeno) utilizado en el viaje ω .
- k constante que convierte los kilómetros recorridos en kilogramos de hidrógeno necesarios para recorrer ese mismo número de kilómetros.
- $q_{(j,j')}^t$ número de viajes por vehículo desde la ciudad j hasta la ciudad j' en el periodo de tiempo t .
- $N_{j/a}$ máximo número de estaciones de repostaje de hidrógeno que pueden operar en la ciudad o nodo j o en el camino mínimo o arco a .
- ξ_j^t número de kilómetros recorridos por un usuario tipo residente en la ciudad j en el periodo de tiempo t .
- μ_j^t proporción de kilómetros interurbanos y urbanos viajados por un usuario tipo residente en la ciudad j durante el periodo de tiempo t .
- P_j^t población de la ciudad j en el periodo de tiempo t .
- β_r, α_r parámetros del modelo logit anidado, utilizados para determinar las ventas de vehículos en función de la utilidad de cada uno de los vehículos.
- $\kappa_{t'}^t$ costes de operación, mantenimiento y amortización de la infraestructura de repostaje de hidrógeno en el periodo de tiempo t para una infraestructura de repostaje de hidrógeno abierta en el periodo de tiempo t' .
- γ^t parámetro que mide el subsidio aportado por el estado, por cada kilogramo de hidrógeno vendido por las infraestructuras de repostaje de hidrógeno, en el periodo de tiempo t .
- ν^t umbral de pérdida económica a partir del cual el propietario de la infraestructura de repostaje de hidrógeno decide cerrar dicha infraestructura en el periodo de tiempo t .
- λ, θ parámetros del modelo logit anidado que describe el comportamiento de los propietarios de las infraestructuras de repostaje de hidrógeno.
- B_0 nivel de cobertura que ha de ser alcanzado.

- e número de periodos de tiempo posteriores t^* para los que el sistema se puede considerar sostenibles en el tiempo (manteniendo el nivel de cobertura requerido B_0 en la red de infraestructura de repostaje de hidrógeno).

Variables

- x_i^t tomará el valor 1 si la infraestructura de repostaje de hidrógeno i esta operativa en el periodo de tiempo t .
- x_j^t número de infraestructuras de repostaje de hidrógeno operativas en el periodo de tiempo t en la ciudad j .
- $U_{j,s}^{a,t}$ utilidad de comprarse un vehículo alimentado por el combustible alternativo tipo s para su uso en la ciudad j en el periodo de tiempo t .
- c_{ω}^t nivel de cobertura del par origen-destino ω en el periodo de tiempo t .
- $c_{j,s}^t$ nivel de cobertura para un vehículo alimentado por el combustible alternativo tipo s , en la ciudad j en el periodo de tiempo t .
- $g_j^{a,t}$ total de ventas de vehículos alimentados por combustibles alternativos en la ciudad j en el periodo de tiempo t .
- $g_{j,s}^{a,t}$ total de ventas de vehículos alimentados por el combustible alternativo tipo s en la ciudad j en el periodo de tiempo t .
- G_j^t total de vehículos eléctricos de pila de combustible alimentados por hidrógeno en la ciudad j en el periodo de tiempo t .
- n_{ω}^t número de infraestructuras de repostaje de hidrógeno construidas en la ruta que satisface el par ω in en el periodo de tiempo t .
- n_j^t número de infraestructuras de repostaje de hidrógeno construidas en la ciudad j en el periodo de tiempo t .
- $p_{i,\omega}^t$ probabilidad de que un usuario del par origen-destino ω reposte su vehículo en la estación de repostaje de hidrógeno i en el periodo de tiempo t .
- c_i^t consumo de hidrógeno en la estación i en el periodo de tiempo t .
- ψ^t variable que determina el subsidio recibido por la estación de repostaje de hidrógeno en el periodo de tiempo t para sus costes de operación, mantenimiento y amortización de la inversión.
- ϕ^t variable que determina el subsidio recibido por una estación de repostaje de hidrógeno en el periodo de tiempo t por cada kilogramo de hidrógeno vendido.
- b_i^t beneficio/pérdida de la estación de repostaje i en el periodo de tiempo t .
- s_i^t subsidio total recibido por la infraestructura de repostaje de hidrógeno i en el periodo de tiempo t .
- U_i^t utilidad percibida por el propietario de la infraestructura de repostaje i para tomar la decisión de incorporar una infraestructura de repostaje de hidrógeno como negocio.

1

Introducción

En este capítulo, se van a introducir los conceptos de movilidad sostenible, los vehículos alimentados por combustibles alternativos que van a ser objeto de estudio, los diferentes aspectos que motivan la realización de la presente tesis doctoral, los objetivos generales y específicos de la tesis doctoral y finalmente un sumario donde se indica la estructura que sigue la tesis doctoral.

1.1. Movilidad sostenible

Movilidad sostenible es un concepto nacido de la preocupación por los problemas medioambientales y sociales ocasionados por la generalización del uso del vehículo particular como medio de transporte. Los inconvenientes de este modelo, entre los que destacan la contaminación del aire, el consumo excesivo de energía, los efectos sobre la salud o la saturación de las vías de circulación; han generado una preocupación creciente por encontrar alternativas que ayuden a evitar o minimizar los efectos negativos de este modelo y encontrar uno nuevo.

Se entiende por actuaciones de movilidad sostenible aquellas que ayudan a reducir dichos efectos negativos, ya sean prácticas de movilidad responsable por parte de personas sensibilizadas con estos problemas (desplazarse a pie, en bicicleta o en transporte público en lugar de en coche siempre que sea posible, compartir un coche entre varios compañeros para acudir al trabajo, etc.), como el desarrollo de tecnologías que amplíen las opciones de movilidad sostenible por parte de empresas o decisiones de las administraciones u otros agentes sociales para sensibilizar a la población o promover dichas prácticas.

A menudo el concepto de movilidad sostenible, se vincula a las nuevas tecnologías desarrolladas en el sector de la automoción a lo largo de las últimas décadas para reducir las emisiones de CO_2 a la atmósfera.

Las políticas de movilidad sostenible, llevadas a cabo por las administraciones públicas, se centran en reducir la congestión de las vías y el consumo de combustibles fósiles contaminantes. Por ello, a menudo impulsan el uso de vehículos de propulsión alternativa mediante ayudas a la compra, que gestionan las comu-

nidades autónomas.

Las políticas para potenciar una movilidad sostenible se centran en los siguientes objetivos:

- Configurar un modelo de transporte más eficiente para mejorar la competitividad del sistema productivo.
- Mejorar la integración social de los ciudadanos, proporcionando accesibilidad a todos los ciudadanos.
- Incrementar la calidad de vida de los ciudadanos.
- No comprometer las condiciones de salud de los ciudadanos.
- Aportar más seguridad en los desplazamientos.

Es importante destacar que la industria del automóvil tiene una importancia estratégica para la economía Europea, y sus productos y servicios tienen un impacto cotidiano en la vida de los ciudadanos Europeos.

Se estima, según datos de la Unión Europea, que el sector representa alrededor de 12 millones de puestos de trabajo directos e indirectos y aporta una contribución positiva sustancial a la balanza comercial de la Unión Europea, llegando en 2011 a 90.000 millones €. Además, esta industria registra el mayor gasto privado en investigación e innovación, unos 28.000 millones € en el 2009 y es un motor esencial de la innovación tecnológica. Produce la mayoría de los vehículos que utilizan los ciudadanos a efectos de movilidad personal y transporte de mercancías. Por tanto, la industria del automóvil será un agente clave en la nueva revolución industrial, que tiene por objeto, entre otras cosas, la sustitución gradual de los hidrocarburos como la principal fuente de energía y una utilización más eficiente y sostenible de los recursos.

Se esperan y deben darse cambios en el sector del automóvil, pues los patrones de producción y los modelos comerciales están cambiando, ya que varios mercados de terceros países están creciendo rápidamente, mientras que el mercado Europeo se considera anticuado. Esto hace crecer la presión competitiva intensa y las empresas de la Unión Europea se ven cada vez más amenazadas en su mercado doméstico, al tiempo que desarrollan oportunidades en mercados de terceros países. Al mismo tiempo, la agenda sobre el clima es cada vez más urgente y se espera todavía más del progreso tecnológico. Para cumplir los objetivos a largo plazo sobre las emisiones de gases de efecto invernadero, así como los objetivos de calidad del aire, debe mejorarse aún más el motor de combustión interna, junto con el desarrollo y aplicación progresiva de tecnologías punta, como la propulsión eléctrica o el hidrógeno. Deben realizarse también esfuerzos considerables para desarrollar y distribuir aún más combustibles sostenibles que puedan ser una alternativa al gasóleo y la gasolina tradicionales. Conjuntamente, la seguridad vial sigue siendo una preocupación importante.

A continuación se presentan una serie de medidas, comprendidas dentro del Plan de Acción para la industria del automóvil en la Unión Europea, que pone

de relieve el compromiso para apoyar la competitividad y la sostenibilidad del sector. Este Plan define acciones políticas concretas basadas en un análisis del sector realizado por el Grupo de Alto Nivel CARS 21, que se relanzó en 2010. Este Plan de Acción se articula en torno a los cuatro pilares siguientes:

- Invertir en tecnologías avanzadas y financiar la innovación mediante una serie de iniciativas reglamentarias y el apoyo a la investigación y a la innovación.
- Mejorar las condiciones del mercado mediante un mercado interior más sólido y la aplicación coherente de la normativa inteligente.
- Mejorar la competitividad en los mercados globales mediante una política comercial efectiva y la armonización internacional de las normativas sobre vehículos.
- Anticipar la adaptación invirtiendo en capital humano y cualificaciones, y suavizar el impacto social de la reestructuración.

Con estas medidas se pretende apoyar el papel activo que el sector del automóvil desempeñará para invertir la cuota de mercado descendente de la industria en Europa y pasar del nivel actual del 16 % al 20 % del PIB de aquí a 2020. El refuerzo de la competitividad de este sector en la Unión Europea, el apoyo para aprovechar las oportunidades de crecimiento en los mercados globales y la promoción de vehículos limpios, seguros y eficientes, incluidos en un enfoque político integrado, serán decisivos.

1.1.1. El estudio CARS 21

La Comisión Europea dentro de la Estrategia Europea sobre vehículos limpios y energéticamente eficientes, encomendó, a finales de 2010, al Grupo de Alto Nivel CARS 21 (creado en 2005), el objetivo de formular recomendaciones para apoyar la competitividad y el crecimiento sostenible de la industria e Europea del automóvil.

El Grupo presentó su informe el 6 de junio de 2012 en el que se recogía la estrategia a llevar por parte del sector del automóvil de cara al año 2020, formulando una serie de recomendaciones específicas. Este Grupo estaba compuesto por siete comisarios, nueve representantes de los Estados miembros y una parte interesada, que incluía a representantes de la industria y a ONGs.

El informe muestra de una forma clara que no puede mantenerse la situación actual de la industria del automóvil: es preciso adaptar las capacidades de producción actuales, diseñar nuevos métodos de producción, asegurar nuevas fuentes de materias primas y un uso más eficiente de las mismas, y desarrollar nuevos modelos de clústeres y empresas. Del mismo modo, se necesitan nuevos perfiles de cualificaciones y hay que afrontar los posibles cambios en las necesidades de empleo.

En este contexto, el Grupo ha definido un punto de vista común sobre las características fundamentales de una industria del automóvil fuerte y competitiva, dando especial importancia a asegurar una transición económica y social sin problemas y equilibrada mediante la anticipación de las necesidades de cualificaciones y formación, y gestionar la reestructuración con una buena preparación, lo que favorecerá la adaptación de las empresas y la transición del empleo, además del progreso hacia una movilidad sostenible para la sociedad de la Unión Europea en 2020 del siguiente modo:

- El sector del automóvil debe tener una importancia estratégica, ofreciendo un empleo de calidad a millones de trabajadores en la Unión Europea, además de ser central para muchas otras actividades económicas al tiempo que suministra productos asequibles y atractivos que satisfagan las exigencias del consumidor.
- Un sector que exporte un mayor abanico de vehículos de gran calidad y alta tecnología a mercados de terceros países.
- Una industria del automóvil líder en tecnología, coordinada con el sector de suministro de combustible, que produzca vehículos atractivos para los consumidores de la Unión Europea, limpios en términos de contaminantes regulados, más eficientes desde el punto de vista del combustible, seguros, silenciosos y conectados.
- Una variedad de tecnologías de propulsión, dominadas por la tecnología avanzada de motores de combustión, pero cada vez más electrificados. Además, el despliegue de vehículos con sistemas avanzados de propulsión (como vehículos eléctricos y vehículos de pila de combustible) está cobrando importancia.
- Una infraestructura apropiada para rellenar o recargar los vehículos que utilizan combustibles alternativos, de conformidad con sus posibilidades de mercado.
- Una mano de obra para la fabricación, la I+D y el mantenimiento formada y preparada para trabajar con un gran número de tecnologías.

1.1.2. Situación actual de la industria del automóvil en España

El año 2014 posicionó a la industria del automóvil como el tercer motor económico del país, detrás del turismo y la industria agroalimentaria. De tal forma que la fabricación de automóviles y de equipos y componentes ha pasado a tener un peso relevante. Aunque mantiene baja la participación de la industria sobre el PIB (7 %, frente al 10,4 % que llegó a tener en el año 2000), y del empleo sobre el total de la economía (8,2 %, frente al 11 % que llegó a representar en ese mismo año).

Dentro del contexto Europeo y mundial, España continúa manteniendo una posición privilegiada. Cerró el ejercicio 2014 con el mayor incremento entre los

principales países productores de la Unión Europea y el mejor dato de los últimos cinco años.

Las claves de este ascenso son el fuerte impulso exportador, el dinamismo del sector de componentes afincado en España y la reacción del mercado interior, gracias a los planes PIVE y PIMA Aire.

La producción de vehículos en el primer cuatrimestre de 2015 se situó cerca del millón de unidades, siendo los turismos los principales impulsores del crecimiento, mientras que el resto de los segmentos han tenido una evolución negativa, entre ellos los vehículos industriales.

La tradicional fortaleza exportadora Española también ha ayudado a los resultados de la producción de vehículos, favoreciendo un crecimiento de un cuarto de millón de coches más en el año anterior. La gran variedad de modelos han favorecido el capítulo exportador hasta el punto de que, en solo dos años, las empresas españolas han conseguido 30 nuevos destinos compradores, llegando a 120 países. Las ventas de coches fuera de la Unión Europea de los 15 rozan el 26%, frente al 12% del año 2009 y si se tiene en cuenta la UE-27, estos mercados siguen absorbiendo el 80% de las ventas españolas al exterior. El incremento en los mercados de Estados Unidos, de Corea del Sur y Japón han sido determinantes en estos resultados.

Las inversiones productivas en las plantas de vehículos españolas han ascendido a 5.400 millones de € entre los años 2012 y 2014, y para el período 2015-2019 se prevén otros 5.000 millones de €, lo que garantiza la carga de trabajo a medio plazo, con una media de inversión de 1.700 millones de € al año.

Respecto al mercado interior, España ha pasado de ser el décimo mercado del mundo en el año 2007 al decimosexto en 2014. Aunque el buen resultado en este último año ha venido favorecido por comportamiento de la demanda, ayudando a que el incremento de los turismos triplicara la media europea y colocando a España como líder del crecimiento entre los principales mercados del continente. Supone el mayor aumento de los últimos 15 años pero todavía representa la mitad de las matriculaciones que había antes de la crisis. .

1.1.3. Situación actual de la industria del automóvil en Europa

En Europa, en 2012, las tres mayores empresas privadas por inversión en I+D+i pertenecieron al sector de automoción, liderando la inversión en el continente con 30.000 millones de € de media al año. Los 396.000 millones de € aportados a las arcas europeas, en impuestos anuales, contribuyen de manera importante a la economía de los 15. En su conjunto (industrias ensambladoras y de componentes) la inversión del sector se eleva a los 41.538 millones de € anuales. Evolución que viene favorecida por la devaluación del € frente al \$.

La fabricación de vehículos, durante el período 2008-2014, tuvo sus peores

años en 2008, 2009 y 2012, con un media del 12,5 % de caída, aunque el acumulado de todo el período reflejó un incremento del 13,3 %, el 1,1 % de media anual, gracias a las matriculaciones del año 2013, año que facilitó la recuperación de las matriculaciones, llegando a superar las del año 2007 de forma sensible en 2014.

La UE-28 fabricó 17,2 millones de vehículos en 2014, el 19 % de la producción global de automóviles y el 21 % de los turismos (15 millones de unidades). El mercado de la UE-27 matriculó 14,4 millones de vehículos en 2014, el 16 % del global y el 18 % de los turismos de todo el mundo (12,6 millones).

En ese año, la UE-28 tuvo un incremento del 6,2 %, siendo la producción española la que mejor resultado ofreció (11,8 %), seguido a distancia por la de Francia (6,6 %) e Italia (5,6 %), que son los tres países donde la crisis afectó de forma más importante. Mientras que el crecimiento alemán es más discreto (4 %), siendo nulo el del Reino Unido, ya que su comportamiento durante la crisis fue mejor.

La producción de turismos en la UE creció un 5,1 % en el primer trimestre de 2015, contribuyendo España con casi con el 24 %, mientras que Alemania redujo su producción en un 0,5 %. Las ventas llegaron a los 4,2 millones de unidades, con un incremento del 2,2 % sobre el mismo período del año 2014.

También en el año 2014, la balanza comercial del sector del automóvil registró un superávit de 90.153 millones de € en la Unión Europea, tras venderse 5,5 millones de vehículos al exterior. Las importaciones crecieron casi un 2 %, el 74 % de las mismas corresponden a cuatro países (Estados Unidos, Japón, Turquía y Corea del Sur), mientras que las exportaciones lo hicieron en un 2,7 % (114.249 millones de €), dirigidas a Estados Unidos como principal destinatario de vehículos de la Unión Europea, con un incremento del 5,8 % y concentrando el 18 % de los vehículos vendidos en el exterior, por delante del crecimiento acelerado dirigido al mercado chino, constituyendo los dos países los que, con diferencia, acaparan las exportaciones del continente, casi el 30 % de las ventas totales. El saldo positivo es un 2,9 % superior al registrado en 2013.

1.1.4. Plan de acción de la Unión Europea

a. Invertir en tecnologías avanzadas y financiar la innovación.

En el sector del automóvil, como en otros, se tiende a un conjunto de tecnologías nuevas, limpias y seguras que está previsto que se introduzcan en el mercado en los próximos años. Este hecho es fundamental, para que Europa permanezca en la vanguardia, desarrollando las soluciones de mañana para ofrecer una movilidad sostenible. Esto debería fomentarse con un apoyo bien orientado y coordinado a una investigación e innovación que respondan a las necesidades de la industria, y que tengan por objeto desarrollar tecnologías a más largo plazo. Es preciso adoptar un enfoque político holístico que complemente las iniciativas reglamentarias a nivel de la Unión Europea, nacional y local, acompañado de medidas relativas a las infraestructuras y la demanda, a fin de impulsar las

inversiones en los próximos años.

b. Investigación, desarrollo e innovación (I+D+i).

La inversión en I+D+i garantiza la competitividad, además es un instrumento clave para recuperarse de la crisis económica y para afrontar la presión competitiva actual en términos de liderazgo tecnológico. Es importante señalar que los fondos europeos prestan una ayuda importante a la industria automovilística de la Unión Europea, que necesita financiar al mismo tiempo la I+D+i de varias tecnologías de propulsión (mejora continua de los motores de combustión y desarrollo de sistemas de propulsión eléctrica, de pila de combustible e híbridos) conforme al objetivo fijado para 2020, de disponer de un abanico diverso de combustibles para cumplir los objetivos en materia de cambio climático. El desarrollo de la seguridad vial es otro ámbito en el que hay todavía gran margen de mejora basada en datos reales con respecto a la seguridad de los vehículos.

El presupuesto en este ámbito es de un total de 80.000 millones € y tiene como horizonte el año 2020 para financiar la investigación y la innovación en el periodo 2014-2020. Este presupuesto incluye el compromiso de conseguir un sistema de transporte europeo eficiente en el consumo de recursos y respetuoso del medio ambiente.

Y también se está aplicando el Plan Estratégico Europeo de Tecnología Energética, que aborda la agenda de investigación e innovación de varios ámbitos de importancia estratégica para el sector del transporte, en particular, las redes eléctricas inteligentes, los combustibles alternativos, (bioenergía e hidrógeno), y el almacenamiento de energía. A este respecto, se asegurarán los vínculos apropiados con la Estrategia de Tecnología de Transporte.

Todo esto hace que la Unión Europea, junto con la industria, trabajará para elaborar una propuesta sobre la Iniciativa Europea por unos vehículos verdes en el marco de Horizonte 2020, incluida una plataforma para desarrollar tecnologías de vehículos limpias y eficiente desde un punto de vista energético. La iniciativa atraerá financiación privada para ayudar a abordar los desafíos fundamentales propuestos para Horizonte 2020.

c. Reducción de las emisiones de CO_2 .

La promoción de nuevas tecnologías a bordo de los vehículos con menor consumo de energía y emisión de CO_2 , desplegadas de manera rentable, apoyará la creación de valor añadido y puestos de trabajo en la industria del automóvil y reducirá las importaciones de petróleo disminuyendo, de esta manera la dependencia energética de la Unión Europea.

El consumo de combustible y las emisiones pueden reducirse también sustancialmente mediante los incentivos por la compra de vehículos de menores emisiones. Valga como dato que para el año 2020, con respecto a los vehículos comerciales ligeros, los Reglamentos respectivos sobre emisiones de CO_2 han establecido el objetivo de 95 g CO_2/km para los turismos y de 147 g CO_2/km para los vehículos comerciales ligeros.

d. Emisiones sonoras y contaminantes.

En los últimos años, ha quedado claramente demostrado que los procedimientos actuales utilizados para medir los contaminantes, las emisiones de CO_2 y el consumo de combustible de los vehículos comerciales ligeros, no reflejan suficientemente las emisiones en condiciones de conducción real. Por lo que, se prevé y se está preparando actualmente a nivel mundial una revisión de los ciclos de conducción y el procedimiento de ensayo, sobre la base de datos recogidos en condiciones de conducción real. La mejora del ciclo de ensayo y el establecimiento de condiciones claras de ensayo que proporcionen valores comparables y representativos, son importantes para ofrecer las reducciones esperadas de las medidas reglamentarias, incentivos financieros e información fiable a los consumidores.

Además, se está revisando la legislación sobre emisiones sonoras de vehículos, sobre la base de una evaluación de impacto. Las consecuencias para la salud relacionadas con el ruido se reducirán mediante valores límites más estrictos. Se ha elaborado y evaluado en los últimos años un nuevo procedimiento de ensayo. Este procedimiento es más representativo de la conducción real y ya puede aplicarse. Juntas, estas disposiciones contribuirán a reducir los niveles sonoros del tráfico rodado.

e. Seguridad vial.

La seguridad vial ha sido y seguirá siendo una prioridad, de hecho, la Unión Europea es líder a nivel mundial en el ámbito de la seguridad vial y el parque móvil es comparativamente nuevo y seguro. El diseño de los automóviles es muy importante para evitar las colisiones y protege contra ellas, en particular con la ayuda de los dispositivos de seguridad exigidos en el marco de la homologación de la Unión Europea.

Se han hecho grandes progresos en la disminución de la mortalidad en carretera, mediante una combinación de acciones relativas a los vehículos, los conductores y las infraestructuras, aplicadas a nivel de la Unión Europea y a nivel nacional y local. Sin embargo, para el 2020 se propuso el nuevo objetivo de reducir a la mitad el número total de víctimas mortales en las carreteras de la Unión Europea a partir de 2010.

f. Combustibles alternativos e infraestructuras.

Para cumplir los objetivos de la Unión Europea en relación con el cambio climático y para mejorar su seguridad energética, se hace necesaria una diversificación apropiada de las fuentes de energía utilizadas para el transporte. Aunque todavía hay importantes reservas de hidrocarburos, es posible que los precios lleguen a ser cada vez más volátiles a medida que disminuye la capacidad excedentaria. Junto con la mejora de la eficiencia energética, esto exige también la comercialización de combustibles alternativos, como la electricidad, el hidrógeno, los biocombustibles sostenibles, el biogás y los Gases Licuados del Petróleo. Dada la novedad de muchos combustibles, su rendimiento debería estar sujeto a un examen constante.

La penetración en el mercado de combustibles alternativos, demanda la creación de infraestructuras apropiadas, así como el desarrollo posterior de un mer-

cado de vehículos pertinentes, lo cual servirá también para promover el crecimiento económico y la creación de puestos de trabajo. El despliegue de infraestructuras de combustibles alternativos debería ser paralelo al desarrollo tecnológico y a los índices de penetración en el mercado de los vehículos propulsados por combustibles alternativos, teniendo en cuenta su rentabilidad.

Son posibles diversas formas de apoyo público a las infraestructuras: proyectos piloto, normalización, apoyo a las inversiones y legislación. Las medidas políticas pueden apoyar la introducción en el mercado, pero después los propios mercados deben decidir cuáles son las mejores soluciones en el marco político establecido, teniendo en cuenta las repercusiones económicas y sociales.

1.1.5. Mejorar las condiciones de mercado

Para asegurar el mantenimiento de una base de fabricación de automóviles en la Unión Europea, solo puede hacerse si se ofrecen a las empresas condiciones comerciales favorables. Por eso, la Unión Europea tiene como prioridad mejorar las condiciones comerciales de la industria ofreciendo un marco fiable, predecible y favorable, así como aplicar los principios de la normativa inteligente, tales como la rentabilidad, los plazos de entrega, los objetivos a largo plazo y la consulta de las partes interesadas. Para ello es necesario:

a. Un mercado interior sólido.

En el contexto económico actual, es difícil tener un mercado interior que funcione bien con condiciones de competencia equitativas, pero es un factor clave para una industria del automóvil sólida y próspera a largo plazo.

La enorme diversidad de la industria europea del automóvil, pues representa a una multitud de pequeñas y grandes empresas, se considera que es una fuerza y una ventaja para el futuro, ya que las pequeñas empresas de hoy pueden ofrecer innovaciones estratégicas mañana y convertirse en representantes fundamentales. Por tanto, es importante fomentar las relaciones constructivas, transparentes y respetuosas entre los diferentes actores del sector del automóvil, incluido el sector de la reparación, el mantenimiento y la atención al cliente.

Otro objetivo importante es reforzar el mercado interior de vehículos de motor de la Unión Europea, para ello, se deben tomar medidas para influir en la demanda, tales como los incentivos financieros.

b. Normativa inteligente.

Para ofrecer un clima favorable a la inversión, es necesario un mercado interior sano y dinámico, con una regulación apropiada que evite cargas innecesarias para las partes interesadas. Los productos de la industria del automóvil se regulan esencialmente mediante el marco legislativo de la Unión Europea sobre homologación. Aunque parece que este sistema funciona en general satisfactoriamente, la evaluación continua sigue siendo necesaria para identificar las posibilidades de mejora, tales como por ejemplo, la seguridad. Esto contribuirá a crear condiciones equitativas para todos los actores y a aumentar la confianza

de los consumidores en la regulación efectiva de los productos, al tiempo que limita las cargas administrativas.

1.1.6. Mejora de la competitividad en los mercados globales

El comercio de productos automovilísticos está progresando constantemente y los mercados de terceros países son cada vez más importantes para la Unión Europea, además la industria europea del automóvil ocupa un lugar muy importante en el comercio internacional y se beneficia claramente de las oportunidades de mercado tanto en los mercados antiguos como en los emergentes, lo que compensa parcialmente la difícil situación del mercado europeo. Sin embargo, la situación actual no se puede dar por sentada. La competencia internacional se intensifica rápidamente con nuevos participantes y la evolución constante de la tecnología. Al mismo tiempo, asegurar un mercado global abierto sigue siendo un desafío, debido sobre todo a las barreras no arancelarias existentes y nuevas. Aunque la industria se esfuerza por mantener su ventaja competitiva, las medidas políticas deben garantizar las condiciones equitativas de acceso al mercado. Teniendo en cuenta este objetivo, el informe CARS 21 exalta una acción a través de la política comercial en el sentido más amplio, incluido el acceso al mercado y la armonización reglamentaria.

a. Política comercial.

Es necesaria una coordinación estrecha entre la política comercial y la industrial, ya que es el mejor modo de suprimir las barreras no arancelarias al comercio. Es también preciso reforzar la cooperación bilateral en materia de reglamentación con terceros países, a fin de suprimir las barreras no arancelarias en el sector del automóvil.

b. Armonización internacional.

La armonización internacional de los reglamentos sobre vehículos, ha sido una prioridad durante muchos años. El hecho de acordar reglamentos comunes con otros mercados importantes del planeta, ofrece la ventaja de reducir los costes de cumplimiento, genera economías de escala y reduce las barreras técnicas al comercio. El objetivo general debe ser establecer el principio de sometido a ensayo una vez, admitido en todos los sitios, al tiempo que se garantiza la promoción y el mantenimiento de las normas de seguridad y protección del medio ambiente más exigentes.

1.1.7. Anticipar la adaptación y gestionar la reestructuración

La posición competitiva de los lugares de producción cambia a lo largo del tiempo a través de los parámetros económicos y sociales. Las empresas, los trabajadores y las economías que se adaptan más rápidamente a la nueva situación, son las que obtienen ventaja en el mercado global. Los puntos fuertes de la economía europea se basan en el conocimiento y la excelencia. Esto significa que Europa necesita invertir más en su capital humano y adaptar sus capaci-

dades de producción a las nuevas realidades, incluidas las nuevas tecnologías y los mercados en evolución. La intervención pública debe centrarse en ayudar a los trabajadores y las empresas en su adaptación, salvaguardar el mercado interior y las condiciones equitativas, y asegurar que las consecuencias sociales negativas de cualquier reestructuración sean mínimas.

a. Capital humano y cualificaciones.

La inversión en capital humano a través del desarrollo de las cualificaciones y la formación es completamente esencial para mantener una base de fabricación en Europa. La disponibilidad de una mano de obra cualificada es un factor clave para el crecimiento y la competitividad de la industria del automóvil y será indispensable para tener una posición de liderazgo en las tecnologías punta. Pero es preciso ofrecer a los trabajadores las cualificaciones apropiadas, así como formación profesional y aprendizaje permanente.

La escasez de cualificaciones es un problema fundamental. Por lo que se hace preciso emprender rápidamente acciones a nivel nacional, con objetivos a largo plazo para modernizar sobre todo los sistemas de educación y formación a fin de mejorar la provisión de cualificaciones, entre otras cosas mediante nuevos programas de estudios, la apertura de la educación y la formación a través de las TIC y nuevas formas de asociación con los empresarios.

b. Abordar el ajuste industrial.

La industria del automóvil se enfrenta, por una parte, al problema de la disponibilidad de una mano de obra cualificada y por otra, que es necesario abordar las consecuencias sociales de la reestructuración cuando la pérdida de puestos de trabajo es inevitable. Debido a que ya se han tomado algunas decisiones de reestructuración que reflejan el descenso de las ventas en el mercado europeo y puede que sean precisos más ajustes, es fundamental evitar una situación en la que el cierre de fábricas o la reducción de plantillas repercutan en toda la economía regional debido a los despidos.

Por todo esto las empresas deben cumplir lo dispuesto en las Directivas de la Unión Europea sobre despidos colectivos e información y consulta a los trabajadores y tener en cuenta las buenas prácticas en materia de anticipación del cambio. A este respecto, un buen diálogo social a todos los niveles (empresarial, local, nacional y de la Unión Europea) es un elemento clave de la anticipación y buena gestión de los procesos de reestructuración. Aunque el proceso de reestructuración es sobre todo responsabilidad de la industria, la Comisión, los Estados miembros y las autoridades locales deben tener un papel complementario.

1.1.8. Seguimiento del plan de acción.

Continuar con el seguimiento entre las partes interesadas más importantes, tanto del sector público y privado, y de la sociedad civil, en este sector industrial estratégico han puesto de relieve la utilidad y la necesidad de continuar el diálogo, además, se debe crear un grupo de trabajo sobre vehículos limpios.

Para ello, la Unión Europea ha encomendado a CARS 2020 el seguimiento y la inspección periódica de la aplicación de las recomendaciones y el Plan de Acción de CARS 21.

El seguimiento se hace patente tras la presentación del Plan de Acción, ya que la Unión Europea puso de manifiesto su empeño en la movilidad sostenible con la publicación de propuesta de Directiva Europea con fecha 24 de Enero de 2013, con nombre: Energía limpia para el transporte: Estrategia europea en materia de combustibles alternativos. Esta Directiva, ha sido aprobada el 18 de Noviembre de 2014.

1.2. Vehículos alimentados por combustibles alternativos

En este apartado, se describen las principales características de los vehículos alimentados por combustibles alternativos considerados en la presente tesis doctoral (electricidad, hidrógeno y gas natural) aportando una visión básica de la tipología y modo de funcionamiento de cada uno de ellos.

Para poner de relieve las características de los principales combustibles alternativos, se van a analizar conceptos como la densidad energética por unidad de masa (cuanta energía tiene 1 kg de combustible) y la densidad energética por unidad de volumen (cuanta energía tiene 1 m^3 de combustible). Estos datos de densidad energética por unidad de masa y densidad energética por unidad de volumen, se pueden observar en la figur 1.1 y 1.2.

Figura 1.1: Densidad de energía de diferentes combustibles por unidad de masa.
Fuente: Asociación Española del Hidrógeno

Como se puede observar, el hidrógeno es el combustible que tiene mayor densidad de energía por unidad de masa, es decir, un kilogramo de hidrógeno tiene mucha cantidad de energía, pero a la vez es el combustible que menor cantidad

Figura 1.2: Densidad de energía de diferentes combustibles por unidad de volumen.

Fuente: Asociación Española del Hidrógeno

de energía tiene por unidad de volumen, es decir, un m^3 de hidrógeno tiene muy poca energía. Esto hace necesario que para almacenar una cantidad de energía considerable, sea necesario recurrir a diferentes sistemas de almacenamiento como pueden ser los siguientes:

- Hidrógeno comprimido. Se suele utilizar en movilidad, a 350 bar para autobuses y carretillas elevadoras y a 700 bar para turismos.
- Hidrógeno licuado. Se suele utilizar para transportar hidrógeno en grandes cantidades, pero se consume mucha energía, alrededor del 30% en su licuación.
- Hidruros metálicos. Son aleaciones bimetálicas que pueden albergar hidrógeno en los huecos existentes en su estructura. No se suele utilizar para movilidad por el gran peso que supone el uso de este tipo de materiales.
- Compuestos químicos. El hidrógeno se puede combinar químicamente con otros productos para formar por ejemplo amoníaco, metanol, etc., lo que facilitaría su transporte, volviéndose a separar en destino.
- MOF (Metal-Organic Framework). Constituyen una nueva vía de gran interés para la adsorción de hidrógeno, pues llegan a alcanzar valores de superficie específica BET superiores a $6.000 m^2/g$ y capacidades de adsorción de hidrógeno muy superiores a las de los materiales microporosos convencionales como las zeolitas o los carbones activados.

1.2.1. Vehículo eléctrico de pila de combustible (Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV)

El hidrógeno no es un recurso natural, sino un vector energético, lo que implica que hay que producirlo. Se puede obtener de diferentes recursos natura-

les, como por ejemplo el agua, biomasa, combustibles fósiles, microorganismos, utilizando diferentes procesos de transformación, como por ejemplo electrolisis, gasificación, reformado, termólisis, etc.

La generación de hidrógeno asociado a energías renovables es la forma óptima de generación desde el punto de vista ambiental, pues se aprovechan los excedentes de energías renovables para generar hidrógeno mediante electrolisis, siendo suministrado al vehículo eléctrico de pila de combustible, el cual combinará el hidrógeno con el oxígeno del aire, generando electricidad y calor, teniendo como única emisión vapor de agua.

En la actualidad, la mayor parte del hidrógeno (el 96 %) se obtiene a partir de gas natural, carbón o petróleo. Lo más habitual es obtenerlo mediante reformado de gas natural con vapor de agua. En su obtención se consume energía y se emite CO_2 y otros gases contaminantes.

El hidrógeno es difícil de almacenar pues tiene una densidad muy baja (unas 13 veces inferior a la del aire) y a temperatura ambiente ocupa mucho volumen. Para almacenarlo, existen diferentes tecnologías disponibles, siendo las mas habituales la compresión a elevadas presiones (entre 350 a 700 bares) y la licuación, teniendo que enfriar el hidrógeno hasta $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ (consumiendo entre el 30 % y el 40 % del contenido de energía del hidrógeno).

Una pila a combustible es un dispositivo electroquímico, que es capaz en una sola transformación, de convertir la energía química del combustible (en este caso hidrógeno) en energía eléctrica, mediante su combinación con el oxígeno del aire.

El hidrógeno en automoción puede utilizarse en vehículos eléctricos de pilas de combustible o en vehículos térmico de combustión interna. En la actualidad, se utilizan los vehículos eléctricos de pila de combustible por su mayor eficiencia global, simplicidad de mantenimiento y por la apuesta que están realizando los fabricantes en lo referente al uso de pilas de combustible para los vehículos alimentados por hidrógeno.

El hidrógeno se diferencia de las baterías en que éstas tienen almacenado el combustible y comburente, mientras que una pila de combustible se alimenta de los reactivos (hidrógeno y aire u oxígeno) desde un depósito exterior. Se diferencia de un motor a combustión interna convencional en las temperaturas más bajas a las que tiene lugar la reacción, en la no existencia de partes móviles, en su mayor rendimiento, y sobre todo, en los productos no contaminantes que se desprenden de la reacción, en el caso de estar alimentados directamente en H_2 .

En definitiva, el vehículo eléctrico de pila de combustible alimentado por hidrógeno, es un vehículo eléctrico, en el que se sustituye la batería por la pila de combustible que proporciona mayor potencia por unidad de peso y un sistema de recarga más rápido. Lógicamente la recarga de la pila de combustible no es tal, sino que se trata del llenado del tanque de hidrógeno. A partir de la pila de combustible, el resto del vehículo es idéntico al vehículo eléctrico.

En la actualidad, existen dos fabricantes que disponen ya de vehículos eléctricos con pila de combustible alimentados por hidrógeno a nivel comercial (Hyun-

dai y Toyota) y varios fabricantes que disponen de prototipos tecnológicos muy avanzados, con previsiones de salir al mercado en el corto plazo (General Motors, VolksWagen, Audi, etc.).

Hyundai IX35.

La potencia del motor eléctrico del Hyundai IX35 FCEV es de 136 CV (100 kW) y 300 Nm de par, y esa misma potencia tiene la pila de combustible. El vehículo pesa 1.830 kg en vacío, acelera de 0 a 100 km/h en 12,5 s y puede alcanzar los 160 km/h. En Europa homologa un consumo combinado de 0,95 kg de H_2 /100 km. Esto en gasolina equivale a unos 3,6 l/100 km. Energéticamente hablando viene a consumir unos 31,3 kWh/100 km.

Tiene una autonomía homologada de 594 km y puede repostar (los dos tanques de los que esta compuesto el sistema de almacenamiento) en alrededor de 3 minutos.

Debajo del maletero está el tanque de hidrógeno grande, de 104 l, lo que hace que el suelo del maletero esté más alto que en un IX35 de gasolina o diésel, pero que aún así permite tener todavía un maletero de tamaño bastante decente, de 415 l (el convencional tendría 465 l).

Debajo de los asientos posteriores está el tanque de hidrógeno pequeño, de 40 l. Entre los dos suman 144 litros de capacidad. Comprimido a 700 bares de presión (unas 690 veces la presión atmosférica), caben en total 5,64 kg de hidrógeno gas. Ambos tanques son multicapa, con un interior de aluminio, un aislante, una capa de fibra de carbono y un recubrimiento de acero. Pesan en total 174 kg y se deben revisar cada 3 años. Han de ser sustituidos a los 15 años.

Debajo de los asientos delanteros está la batería de polímeros de litio. Tiene una capacidad de 0,95 kWh y permite entregar 24 kW de potencia (32,6 CV). Se utiliza como bufer temporal y para almacenar energía en la frenada regenerativa. Pesa 47 kg.

Entre los asientos delanteros, debajo del suelo también, se encuentra el inversor (de corriente continua a alterna y viceversa).

En el vano motor, apilado como si se tratase de un motor de combustión, se encuentra la caja de conexiones, la pila de combustible de membrana de intercambio de protones (PEM), otro inversor, la unidad de control de potencia, la unidad de frenada regenerativa, el sistema de aspiración de aire, el sistema de refrigeración, el motor eléctrico de jaula de ardilla y el engranaje reductor (entre otras cosas). La pila de combustible viene a tener un rendimiento de entre el 50 y el 60 % y según las pruebas de Hyundai sufre una merma de su potencia del 15 % a los 225.000 km.

Toyota Mirai.

El sistema propulsor del Mirai lo componen, a grandes rasgos, los siguientes elementos: un motor eléctrico, una pila de combustible, dos depósitos de hidrógeno y una batería.

Figura 1.3: Especificaciones técnicas Hyundai IX35.
Fuente:Hyundai.

El motor eléctrico está colocado por delante del eje delantero y da una potencia máxima de 154 CV. La electricidad que lo alimenta proviene principalmente de la pila de combustible polimérica alimentada por hidrógeno, que está ubicada bajo los asientos delanteros. El oxígeno se obtiene del aire y el hidrógeno de dos depósitos, colocado uno bajo los asientos traseros y otro por detrás de ellos (a la altura del eje trasero). En total, pueden almacenar aproximadamente 5 kilogramos de hidrógeno a 700 bar de presión. De acuerdo con el ciclo de homologación NEDC, el Mirai consume una media de 0,76 kilogramos de hidrógeno por cada 100 km y tiene una autonomía de 550 kilómetros. Llenar los depósitos de hidrógeno en una estación de repostaje de hidrógeno o hidrogenera, lleva alrededor de 3 minutos.

La densidad energética de la pila es 3,1 kW/l (2,0 kW/kg), que es exactamente la misma que Honda logra en el prototipo FCV Concept. También coincide la presión a la que se almacena el hidrógeno en los depósitos, 700 bar. Con una presión mayor se puede introducir más hidrógeno en los depósitos, sin embargo, el coste energético extra y los refuerzos materiales necesarios no quedan compensados con el incremento de almacenamiento. Por otro lado, 700 bar es la presión de llenado que se ha acordado tomar como estándar en Europa, Estados Unidos y Japón.

La batería es de tipo NiMH (níquel e hidruro metálico) y tiene una capacidad de 1,6 kWh. Cumple dos funciones: la primera es almacenar la electricidad generada en las fases de deceleración y por la pila; la segunda es alimentar al motor eléctrico para mover el Mirai (sea en solitario o sumando su fuerza a la de la pila).

Toyota ofrece una garantía de 5 años o 100 000 kilómetros para todos los elementos relacionados con el sistema de hidrógeno y de 3 años o 100 000 kiló-

metros para el resto de componentes.

Figura 1.4: Esquema de principio Toyota Mirai.
Fuente: Toyota.

1.2.2. Vehículo eléctrico (Full Battery Electric Vehicle, BEV)

Entendemos por vehículo eléctrico (BEV) aquél que utiliza uno o varios motores eléctricos para su tracción a partir de la energía eléctrica almacenada en baterías o acumuladores que se recargan desde la red eléctrica.

En las baterías, la energía química almacenada se transforma en energía eléctrica y posteriormente, a través del motor eléctrico, se convierte en energía mecánica.

Para recargar las baterías, el vehículo eléctrico necesita conectarse a una toma de corriente eléctrica, ya sea de baja intensidad de corriente (recarga lenta) o de alta intensidad (recarga rápida). Entre sus principales características, el BEV destaca por su nula contaminación en los entornos urbanos, ya que en su circulación no produce emisiones contaminantes, siempre que la electricidad provenga de energías renovables.

También cabe comentar su inexistente contaminación acústica, salvo el inevitable ruido causado por su propia rodadura, así como los menores costes de utilización y mantenimiento.

El vehículo eléctrico, además de mejorar la calidad del aire de las ciudades, significa una importante herramienta para reducir nuestra dependencia energé-

tica del exterior, principalmente de los productos derivados del petróleo (gasóleos y gasolinas), al permitir un mayor y mejor aprovechamiento de nuestros recursos energéticos autóctonos, principalmente de las energías renovables, y al mejorar la eficiencia energética en la automoción, reduciendo además la emisión de gases de efecto invernadero.

Al igual que en el caso de los vehículos con motor de combustión interna, se pueden encontrar diferentes tipologías de vehículos eléctricos.

- Vehículo Eléctrico de Batería (BEV): Está impulsado por un motor eléctrico en lugar de un motor de combustión. El vehículo tiene una batería que se carga con electricidad de la red eléctrica.
- Vehículo Eléctrico de Autonomía Extendida (EBEV): Está equipado con un motor de combustión que trabaja en un régimen óptimo para recargar las baterías que alimentan el motor eléctrico y que también cuentan con opción de carga a la red eléctrica. En ningún momento el motor de combustión propulsa directamente el vehículo.
- Vehículo Eléctrico Híbrido Enchufable (PHEV): Está equipado con un motor eléctrico y un motor de combustión de apoyo. La diferencia con el anterior tipo es que puede funcionar combinando los dos motores o en modo completamente eléctrico. La combinación de un motor eléctrico y otro de combustión permite cubrir distancias más largas que uno completamente eléctrico. Cuando la batería alcanza un nivel mínimo, el motor de combustión se pone en marcha y funciona como un vehículo eléctrico híbrido (BEH).

En la presente tesis doctoral, se va a considerar el vehículo eléctrico de baterías, es decir, el BEV. En la figura 1.5 se pueden observar especificaciones técnicas de diferentes tipos de vehículos eléctricos de baterías.

1.2.3. Vehículo de gas natural comprimido (Compressed Natural Gas Vehicle, NGV)

El uso de gas natural como combustible en motores alternativos tiene sus ventajas, como la mayor duración de los lubricantes, las bujías de encendido y, en general, la vida del motor.

Sin embargo, el mejor uso del gas natural como combustible, depende de la adaptación del motor para esta fuente de energía, que puede ir desde una simple sustitución de combustible hasta el diseño completo del motor optimizado para el uso del gas natural, en cuyo caso se igualan y hasta mejoran las prestaciones que proporcionan los otros combustibles líquidos.

El gas natural se utiliza habitualmente en motores de combustión interna alternativos de encendido provocado (MEP o motores tipo Otto). También se puede utilizar en motores de encendido por compresión (MEC); en estos casos suelen

EJEMPLO DE VE. RENAULT KANGOO ZE

Marca	Renault
	Modelo	Kangoo ZE
	Tecnología	ión-litio
	Autonomía (Km)	170
	Velocidad máxima (Km/h)	130
	Precio sin IVA (euros)	Entre 20.000 y 22.000 + 75 euros /mes de alquiler de batería
	Tiempo de recarga Normal	6 horas
	Tiempo de recarga Rápida	2,5h (80%)

EJEMPLO DE EREV. OPEL AMPERA

Marca	Opel
	Modelo	Ampera
	Tecnología	Motor de combustión + Batería de Litio Ión
	Autonomía (Km)	60 en modo eléctrico y 500 en total
	Velocidad máxima (Km/h)	161
	Precio sin IVA (euros)	38.755
	Tiempo de recarga Normal	3 - 4 horas
	Tiempo de recarga Rápida	-

EJEMPLO DE PHEV. TOYOTA PRIUS PLUG-IN HYBRID

Marca	Toyota
	Modelo	Prius Plug-In Hybrid
	Tecnología	Motor de combustión de 73 kW + Batería Litio Ión
	Autonomía (Km)	22 en modo eléctrico puro
	Velocidad máxima (Km/h)	180
	Precio sin IVA (euros)	En el entorno de los 30.000
	Tiempo de recarga Normal	1'5 horas
	Tiempo de recarga Rápida	-

Figura 1.5: Especificaciones técnicas tipos vehículos eléctricos.

Fuente: <http://www.aytopalencia.es>

ser motores diésel transformados y lo habitual es que se emplee una cierta cantidad de gasóleo para provocar la ignición. Las diferentes tipologías de vehículos alimentados por gas natural son las siguientes:

Dedicados, monofuel o monovalente (MEP).

Los motores dedicados usan el gas natural como único combustible. Tienen la ventaja de que han sido optimizados para funcionar con gas natural, asegurando una eficiencia máxima y emisiones óptimas. Son de ciclo Otto (encendido por chispa).

Algunos de los vehículos con este tipo de motores cuentan con un depósito de reserva de gasolina, que puede ser usada si se agota el depósito de gas natural. Dado que el vehículo ha sido optimizado para funcionar con gas natural, la gasolina solo debe ser usada de forma excepcional para viajes cortos donde no exista posibilidad de repostaje de gas natural.

Vehículos bi-fuel ó bivalentes (MEP).

Operan indistintamente con gas natural o gasolina. Son motores MEP que

tienen dos depósitos diferenciados, con dos sistemas diferentes de alimentación y un botón que permite seleccionar uno u otro carburante.

La libertad de circulación de vehículos de gas natural requiere una infraestructura de abastecimiento y distribución, en forma de estaciones de servicio, que actualmente son escasas en España. Por ello se hace necesario, para la mayoría de los vehículos ligeros, mantener la opción de funcionar con gasolina.

La adaptación de los motores de gasolina a gas requiere únicamente una modificación en el avance del encendido. En este caso, los vehículos son reversibles: siempre existe la posibilidad de retirar el sistema de alimentación de gas natural y que el vehículo recupere su estado inicial.

Vehículos dual-fuel ó de combustible dual (MEC).

Disponen de motores MEC que utilizan una mezcla de gas natural y gasóleo. El gasóleo, que actúa como iniciador del proceso de combustión, se inyecta directamente a la cámara de combustión, mientras que el gas natural se introduce en el aire de admisión mediante un carburador o un sistema de inyección.

Cuando el vehículo está al ralentí, funciona con 100 % gasóleo, mientras que a los grados de carga y regímenes de giro más elevados, la proporción de gasóleo puede estar comprendida entre el 5 y el 20 %.

En promedio, este tipo de motores puede consumir del orden de 60-70 % de gas natural y 30-40 % de gasóleo.

Esta tecnología permite adaptar fácilmente motores diésel con sólo reducir su relación de compresión y sin necesidad de adaptarle un sistema de ignición. Presenta el inconveniente de precisar el repostaje de dos tipos de carburantes.

El interés principal de esta solución es la aplicabilidad casi inmediata del gas natural en grandes motores de vehículos pesados a un coste razonable. En contrapartida, la reducción de emisiones, principal argumento del uso del gas natural vehicular, si bien es sustancial en lo referente a partículas sólidas y humos negros, no lo es tanto en las emisiones gaseosas, que se reducen en una proporción más pequeña.

Vehículos de inyección directa de alta presión (HPDI) (MEC).

La tecnología HPDI inyecta simultáneamente gasoil y gas natural a alta presión directamente a la cámara de combustión al final de la carrera de compresión.

El modo de funcionamiento es el de un ciclo Diésel. Al igual que los motores de dual fuel, los de HPDI usan gasóleo para propiciar la combustión, pero alcanzan un porcentaje de sustitución superior al 90 % proporcionando las mismas prestaciones que un motor Diésel convencional en potencia, par, eficiencia y respuestas a transitorios. Además no presentan problemas de *knocking*, ya que la inyección de gas se hace cuando ha acabado la compresión del aire, y sus emisiones de hidrocarburos son bajas.

Paralelamente se están introduciendo nuevos tipos de vehículos y motores

Fiat Panda 1.4 8V Natural Power (bi-fuel)* NEW 2012

Capacidad depósitos: 15 kg GNC + 30 l gasolina
 Autonomía (combinada): 800 km
 Potencia: 69 CV
 Estándar emisiones: Euro 5

Mercedes-Benz B 180 NGT (bi-fuel) NEW 2012

Capacidad depósitos: -
 Autonomía: - km
 Potencia: - CV
 Estándar emisiones: Euro 5

Fiat Punto Evo 1.4 8V Natural Power (bi-fuel)

Capacidad depósitos: 15 kg GNC + 45 l gasolina
 Autonomía (combinada): 1000 km
 Potencia: 70 CV
 Estándar emisiones: Euro 5

Mercedes-Benz E 200 NGT (bi-fuel)

Capacidad depósitos: 19.5 kg GNC + 54 l gasolina
 Autonomía (combinada): 1.070 km
 Potencia: 163 CV
 Estándar emisiones: Euro 5

Fiat Qubo 1.4 8V Natural Power (bi-fuel)

Capacidad depósitos: 15 kg GNC + 45 l gasolina
 Autonomía (combinada): 950 km
 Potencia: 70 CV
 Estándar emisiones: Euro 5

Opel Zafira Tourer 1,6 GNC Turbo ecoFLEX (mono-fuel) NEW 2012

Capacidad depósitos: 25 kg GNC + 14 l gasolina
 Autonomía (combinada): 680 km
 Potencia: 150 CV
 Estándar emisiones: Euro 5

Fiat Fiorino 1.4 8V Natural Power (bi-fuel)

Capacidad depósitos: 15 kg GNC + 45 l gasolina
 Autonomía (combinada): 960 km
 Potencia: 70 CV
 Estándar emisiones: Euro 5

Opel Zafira 1.6 GNC Turbo ecoFLEX (mono-fuel)

Capacidad depósitos: 21 kg GNC + 14 l gasolina
 Autonomía (combinada): 530 km
 Potencia: 150 CV
 Estándar emisiones: Euro 5

Figura 1.6: Turismos y vehículos comerciales ligeros.
 Fuente: NGVA (Natural and bio Gas Vehicle Association).

como son los híbridos de gas natural enchufables, que funcionan en modo eléctrico puro pero tienen la autonomía y capacidad de la combustión cuando van al extrarradio, o los vehículos urbanos con tecnología híbrida.

1.3. Motivación

El desarrollo de la presente tesis doctoral, esta motivada fundamentalmente, por la necesidad acuciante que se tiene a nivel Europeo de reducir las emisiones de CO_2 y la dependencia de los combustibles fósiles. Para ello, se plantea como alternativa viable el uso de combustibles alternativos (electricidad, hidrógeno, gas natural, etc.), pues en la actualidad los diferentes fabricantes están sacando a mercado vehículos alimentados por combustibles alternativos. Para que estos vehículos puedan circular, es necesario que existan infraestructuras de repostaje que incluyan los combustibles alternativos entre sus productos. Motivado por la necesidad de disponer de infraestructuras de repostaje que incluyan los combustibles alternativos, la Unión Europea publicó la Directiva 2014/94/UE, la cual obliga a los estados miembros a disponer de infraestructuras de repostaje de combustibles alternativos.

Por todo lo anteriormente comentado, el desarrollo de la presente tesis doctoral, pretende desarrollar una metodología que defina la política de subsidios óptima para poder desplegar una red de infraestructuras de combustibles alternativos en general y de hidrógeno en particular sostenible en el tiempo, además

de definir el número e identificar la localización exacta de las infraestructuras que han de incluir el hidrógeno como combustible alternativo.

En los apartados siguientes, se profundiza en los diferentes aspectos que forman parte de la motivación de la presente tesis doctoral, para poder entender correctamente el problema planteado.

1.3.1. Necesidad de reducir la dependencia de combustibles fósiles

La movilidad y el transporte europeos dependen enormemente del petróleo importado. Por ejemplo, en el año 2010, el petróleo representó el 94 % de la energía consumida en el sector del transporte, el cual, con un porcentaje del 55 %, es el mayor consumidor de energía. El 84 % de ese petróleo fue importado, con un gasto de 1.000 millones de € diarios en 2011, lo que supone un importante déficit en la balanza comercial de la Unión Europea de cerca del 2,5 % del PIB.

Por otro lado, el suministro de petróleo y, por tanto, la movilidad dependen en gran medida de regiones políticamente inestables, circunstancia que suscita preocupaciones sobre la seguridad del suministro. Las subidas de precios causadas por la especulación sobre las repercusiones de las interrupciones del suministro de petróleo han costado a la economía europea un importe adicional de 50.000 millones de € anuales en los últimos cuatro años.

La repercusión de la dependencia del petróleo en la economía europea es demasiado grande para ignorarla, siendo necesaria la actuación de la Unión Europea para poner fin a esta situación. El desarrollo de una estrategia en el sector del transporte, que sustituya progresivamente el petróleo por combustibles alternativos y cree las infraestructuras necesarias, podría suponer ahorros en la factura de las importaciones de petróleo de 4.200 millones de € anuales en 2020, y de hasta 9.300 millones de € anuales en 2030, y otros 1.000 millones de € anuales derivados de la moderación de las subidas de precios.

1.3.2. Utilización de combustibles alternativos

El apoyo al desarrollo del mercado de los combustibles alternativos y la inversión en sus infraestructuras necesarias en Europa, impulsará el crecimiento y creará una amplia variedad de puestos de trabajo en la Unión Europea. Según un estudio realizado por la European Climate Foundation los vehículos ecológicos podrían generar alrededor de 700.000 empleos adicionales de aquí a 2025. Una intervención enérgica de la Unión Europea, actuando como pionera en materia de soluciones innovadoras para combustibles alternativos, creará también nuevas oportunidades de mercado para la industria europea y reforzará la competitividad de Europa en el mercado mundial emergente.

Aunque la mejora de la eficiencia, estimulada por la normativa europea sobre las emisiones de CO_2 de los vehículos, sigue siendo el objetivo más fácilmen-

te alcanzable a corto y medio plazo, hallar soluciones alternativas al petróleo, con bajas emisiones de CO_2 , es igualmente indispensable para una descarbonización gradual del transporte, un objetivo clave de la iniciativa «Europa 2020: Una estrategia para un crecimiento inteligente, sostenible e integrador», con la que se quiere reducir un 60 % las emisiones de CO_2 en el transporte de aquí al año 2050, tal como figura en la «Hoja de ruta hacia un espacio único europeo de transporte: por una política de transportes competitiva y sostenible» (Libro Blanco de 2011 sobre el transporte). Dichos combustibles, a menudo, también benefician a las zonas urbanas en su empeño por cumplir las obligaciones en materia de calidad del aire impuestas por la Unión Europea.

En la actualidad, la evolución del mercado de los combustibles alternativos aún se ve frenada por deficiencias tecnológicas y comerciales, la falta de aceptación por parte de los consumidores y la falta de infraestructuras adecuadas. El elevado coste actual de las aplicaciones innovadoras de los combustibles alternativos se debe en gran medida a estas deficiencias. Las iniciativas para fomentar los combustibles alternativos en el transporte existen tanto a nivel nacional como de la Unión Europea, pero debe ponerse en marcha una estrategia global coordinada, coherente y estable, con un marco reglamentario que favorezca la inversión.

Como «combustibles alternativos» entendemos los combustibles o fuentes de energía que sustituyen, al menos en parte, a los combustibles fósiles clásicos como fuente de energía en los transportes y que pueden contribuir a la descarbonización de estos últimos y a mejorar el comportamiento medioambiental del sector transporte. Incluyen, entre otros la electricidad, el hidrógeno, los biocarburantes, los combustibles sintéticos y parafínicos, el gas natural incluido el biometano en forma gaseosa (gas natural comprimido GNC) y en forma licuado (gas natural licuado GNL) y el gas licuado del petróleo.

Dentro de los diferentes combustibles alternativos, la presente tesis doctoral se centra en el hidrógeno.

1.3.3. Necesidad de crear una estrategia relativa a los combustibles alternativos

Una estrategia relativa a los combustibles alternativos, que sea coherente a largo plazo, debe cubrir las necesidades energéticas de todos los modos de transporte y ser compatible con la Estrategia Europa 2020, sin olvidar la descarbonización. Sin embargo, las alternativas disponibles y su coste varían en función de los modos de transporte. Al principio, los beneficios de los combustibles alternativos son mayores en las zonas urbanas, donde las emisiones contaminantes suscitan gran preocupación y en el transporte de mercancías, donde las alternativas han alcanzado un nivel de madurez suficiente. Para determinados modos de transporte, especialmente el de mercancías por carretera de larga distancia y el aéreo, las alternativas disponibles son limitadas. No hay una solución de combustible único para el futuro de la movilidad y deben explorarse todas las principales opciones de combustibles alternativos, centrándose en las necesidades de cada modo de transporte.

Un enfoque estratégico para la Unión Europea, que responda a las necesidades a largo plazo de todos los modos de transporte, debe, por tanto, basarse en una combinación global de combustibles alternativos. Todas las opciones deben incluirse en la estrategia, sin dar prioridad a un combustible concreto, manteniendo de este modo la neutralidad tecnológica.

1.3.4. La Directiva 2014/94/UE

La **Directiva 2014/94/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 22 de octubre de 2014 relativa a la implantación de una infraestructura para los combustibles alternativos**, establece un marco común de medidas para la implantación de una infraestructura para los combustibles alternativos en la Unión, a fin de minimizar la dependencia de los transportes respecto del petróleo y mitigar el impacto medioambiental del transporte. Dicha Directiva establece requisitos mínimos para la creación de una infraestructura para los combustibles alternativos, incluyendo puntos de recarga para vehículos eléctricos y puntos de repostaje de gas natural (GNL y GNC) y de hidrógeno, que se habrán de aplicar mediante los marcos de acción nacionales de los Estados miembros, así como mediante las especificaciones técnicas comunes sobre dichos puntos de recarga y de repostaje, y los requisitos de información a los usuarios.

España como Estado miembro, deberá aportar, a más tardar el 18 de noviembre de 2016 su marco de acción nacional para el desarrollo del mercado respecto de los combustibles alternativos en el sector transporte y la implantación de la infraestructura correspondiente, que ha de incluir como mínimo:

- Una evaluación del estado actual y de la futura evolución del mercado respecto de los combustibles alternativos en el sector del transporte, incluido su posible uso simultáneo y combinado, y del desarrollo de infraestructuras para los combustibles alternativos, teniendo en cuenta, cuando proceda, su continuidad transfronteriza.
- Las metas cuantitativas y los objetivos nacionales, con objeto de implantar una infraestructura para los combustibles alternativos, que podrán revisarse, a partir de una evaluación de la demanda a escala nacional, regional o de la Unión, garantizando al mismo tiempo que se cumplan los requisitos mínimos en materia de infraestructura que establece la Directiva.
- Medidas necesarias para garantizar que se alcancen las metas cuantitativas y los objetivos nacionales contenidos en los marcos de acción nacionales.
- Medidas que pueden fomentar la implantación de infraestructuras para los combustibles alternativos en los servicios de transporte público.
- Determinación de las aglomeraciones urbanas o suburbanas, de otras zonas densamente pobladas y de las redes que, según las necesidades del mercado, serán equipadas con puntos de recarga accesibles al público.
- Determinación de las aglomeraciones urbanas o suburbanas, de otras zonas densamente pobladas y de las redes que, según las necesidades del

mercado, serán equipadas con puntos de repostaje de GNC accesibles al público.

- Una evaluación de la necesidad de instalar puntos de repostaje de GNL en puertos no pertenecientes a la red básica de la RTE-T.
- Un examen de la necesidad de instalar un suministro de electricidad en los aeropuertos para los aviones estacionados.

Los Estados miembros se asegurarán de que los marcos de acción nacionales tengan en cuenta las necesidades de los distintos modos de transporte existentes en su territorio, incluidos aquellos que cuentan con pocas alternativas a los combustibles fósiles.

Los marcos de acción nacionales tendrán en cuenta, en su caso, los intereses de las autoridades regionales y locales, así como los de las partes interesadas.

Cuando sea necesario, los Estados miembros cooperarán, a través de consultas o de marcos estratégicos conjuntos, para asegurar la coherencia y la coordinación de las medidas necesarias para la consecución de los objetivos de la presente Directiva.

Las medidas de apoyo para la infraestructura de combustibles alternativos deberán adoptarse de conformidad con las normas sobre ayudas estatales contenidas en el Tratado de Funcionamiento de la Unión Europea.

Los marcos de acción nacionales serán acordes con la legislación de la Unión en vigor en materia de medio ambiente y de protección del clima.

La Comisión, basándose en los marcos de acción nacionales, publicará y actualizará con regularidad la información relativa a las metas cuantitativas nacionales y a los objetivos presentados por cada Estado miembro en lo referente a:

- Número de puntos de recarga accesibles al público.
- Puntos de repostaje de GNL en los puertos marítimos e interiores.
- Puntos de repostaje de GNL accesibles al público para vehículos de motor.
- Puntos de repostaje de GNC accesibles al público para vehículos de motor.

Si procede, se publicará asimismo información referente a lo siguiente:

- Puntos de repostaje de hidrógeno accesibles al público.
- Infraestructura para el suministro de electricidad en puerto en los puertos marítimos e interiores.
- Infraestructura para el suministro de electricidad en los aeropuertos a los aviones estacionados.

Los Estados miembros que decidan incluir puntos de repostaje de hidrógeno accesibles al público en su marco de acción nacional garantizarán, a más tardar el 31 de diciembre de 2025, la disponibilidad de un número adecuado de los mismos a fin de garantizar la circulación de vehículos con motor de hidrógeno, incluidos los que emplean pilas de combustible, dentro de las redes determinadas por dichos Estados miembros, incluyendo, en su caso, enlaces transfronterizos.

Los Estados miembros garantizarán que los puntos de repostaje de hidrógeno que sean accesibles al público y hayan sido implantados o renovados a partir del 18 de noviembre de 2017 cumplan las especificaciones técnicas establecidas en la Directiva.

La Comisión estará facultada para adoptar actos delegados, destinados a actualizar las referencias a las normas contempladas por las especificaciones técnicas establecidas, cuando vayan a sustituirse dichas normas por nuevas versiones de las mismas adoptadas por los correspondientes organismos de normalización.

1.3.5. Problemática a resolver con el desarrollo de la tesis doctoral

La Directiva sobre la creación de una infraestructura para los combustibles alternativos es un paso importante para resolver el problema del «huevo y la gallina» en la medida en que la infraestructura para los combustibles alternativos no está construida porque no existe un número suficiente de vehículos, y la industria manufacturera no los produce a precios competitivos porque la demanda de los consumidores es insuficiente y los consumidores, en consecuencia, no los compran. La citada propuesta prevé una cobertura suficiente en infraestructuras para garantizar las economías de escala, en el lado del suministro, y los efectos de red, en el lado de la demanda.

Este círculo vicioso entre la oferta y la demanda es el que la Directiva 2014/94/EU pretende romper, obligando a los Estados Miembros a desarrollar los planes de acción. La presente tesis doctoral, ayuda a los Estados Miembros a tomar decisiones óptimas desde el punto de vista técnico-económico, desarrollando una metodología que va a permitir definir una política óptima de subsidios para introducir los combustibles alternativos con criterios de sostenibilidad en el tiempo, y la determinación y localización exacta de las infraestructuras de repostaje.

1.4. Objetivos

En la presente tesis doctoral, se pueden diferenciar entre objetivos generales y específicos.

El objetivo general es ***dar respuesta a la exigencia de la Directiva Europea, en lo relativo al hidrógeno como combustible alternativo, desarrollando una metodología que define políticas de subsidios óptimas que per-***

miten la penetración sostenible en el mercado del hidrógeno como combustible alternativo, a la vez que determina el número y localiza las infraestructuras de repostaje que han de incorporar el hidrógeno en cada periodo de tiempo t . Los modelos de localización tienen la finalidad de acelerar la penetración haciendo eficientes las decisiones sobre el diseño de la infraestructura. Este modelo pretende marcar la hoja de ruta para introducir de forma eficiente el uso del hidrógeno como combustible alternativo en España.

Para poder conseguir el objetivo general anteriormente comentado, es necesario desarrollar una serie de objetivos específicos que son los siguientes:

1. Modelización matemática del problema. Se definirá un modelo de equilibrio de Stackelberg para optimizar las políticas de subsidios introducidas al modelo. Este modelo integra varios submodelos, de forma que se pueda estimar el efecto de una política de subsidio en la demanda de vehículos, en el consumo de hidrógeno y en las decisiones de incorporación o no, de hidrógeno de propietarios de infraestructuras de repostaje. Los submodelos que forman parte de la modelización matemática del problema, son los siguientes:

- **Modelización del tráfico.** Se formulará un modelo, basado en la maximización de la entropía, para obtener el patrón de movilidad en los diferentes periodos de estudio. Adicionalmente, se utilizan algoritmos de caminos mínimos para determinar los caminos por dónde se realizan los viajes y, de todo ello, se inferirán las correspondientes matrices Origen-Destino (O-D).
- **Modelización del comportamiento de los usuarios que adquieren vehículos.** Estimación a lo largo del tiempo del parque nacional automovilístico diferenciando entre convencional y ecológico y, dentro de los ecológicos, diferenciando entre eléctricos, de hidrógeno y de gas natural comprimido. Se emplean los modelos de elección discreta (logit anidado) para predecir la evolución del parque automovilístico según tipo de combustible en función de los atributos (precio de adquisición, coste del combustible, cobertura, tiempo de recarga, autonomía y emisiones de CO_2).
- **Modelización del comportamiento de las infraestructuras de repostaje de combustible,** estando este comportamiento centrado en la decisión de incorporar o no el hidrógeno como combustible alternativo en la infraestructura actual, atendiendo a criterios técnico-económicos. Este submodelo predice la evolución del número de infraestructuras de repostaje que deciden incorporar el hidrógeno como combustible alternativo, en el tiempo y en el espacio.
- **Definición de cobertura de la red de repostaje existente,** la cual depende del número de estaciones de servicio de los diferentes combustibles alternativos existentes. Teniendo en cuenta la cobertura entre las distintas ciudades (inter-ciudad) y la cobertura dentro de las ciudades (intra-ciudad).
- **Definición de políticas de subsidios.** Se analizan diferentes políticas de subsidios, que van a ser decrecientes con el paso del tiempo, con la premisa de optimizar la inversión pública, teniendo que permitir dichas políticas de subsidios la penetración del hidrógeno como combustible alternativo y su sostenibilidad en el tiempo.

2. Desarrollo e implementación de una metodología de resolución para el anterior modelo.

3. Aplicación al caso español, que permite obtener la hoja de ruta que ha de seguir España, para poder disponer de una red de infraestructuras de hidrógeno que haga posible la penetración del vehículo de hidrógeno en la movilidad Española. En la presente tesis doctoral, se aplica la metodología a una red formada por las 5 ciudades con mas habitantes de España (Madrid, Barcelona, Zaragoza, Valencia y Sevilla) y los caminos mínimos que las unen (figura 1.7) para posteriormente hacer las proyecciones para la totalidad del territorio Español. Las carreteras y poblaciones consideradas en la red objeto de estudio, pertenecen a la Red Transeuropea de Transporte (RTE-T) que discurre por España (figura 1.8). De la misma forma se van a estudiar los casos anteriormente comentados, considerando que ademas de los subsidios iniciales (amortización de la infraestructura y kilogramos de hidrógeno vendidos), se subsidia la compra de vehículos eléctricos de pila de combustible alimentados por hidrógeno, obteniendo de esta forma cuatro casos de estudio.

Figura 1.7: Red de estudio planteada.

Figura 1.8: Red Transeuropea de Transporte en España.

1.5. Sumario de la Tesis Doctoral

La presente tesis doctoral se estructura de la siguiente forma:

Un primer capítulo introductorio, donde se define el concepto e movilidad sostenible y el uso del hidrógeno como combustible alternativo, además de identificar la motivación de la realización del trabajo y los principales objetivos de la tesis doctoral.

Un segundo capítulo de estado del arte, donde se realiza una profunda revisión bibliográfica, que permite conocer lo que ha sido realizado hasta la fecha por diferentes investigadores, identificando lo que aporta la presente tesis a la temática de metodologías de despliegue de infraestructuras de repostaje de combustibles alternativos.

Un tercer capítulo, en el que se realiza la descripción de la metodología propuesta en la presente tesis doctoral, para poder dar respuesta a las exigencias de la Directiva 2014/04/UE. Esta metodología implica el uso de diferentes modelos matemáticos que abordan los diferentes aspectos necesarios para dar solución al problema planteado.

- Modelización del tráfico.
- Modelización del comportamiento de los usuarios de vehículos de hidró-

geno.

- Modelización de la cobertura.
- Modelización del comportamiento de los propietarios de las estaciones de servicio.
- Modelización de los incentivos gubernamentales.
- El modelo de localización de las estaciones de servicio.

Un cuarto capítulo de validación de la metodología, donde la metodología definida en el anterior capítulo, se aplica a los siguientes casos de estudio:

1. Estudio para el grafo descrito (5 nodos y 6 arcos), considerando subsidios a la amortización de la inversión y a los kg de H_2 suministrados por la hidrogenera.
2. Extrapolación de los resultados obtenidos para el caso de estudio (1), a la totalidad de España.
3. Estudio para el grafo descrito (5 nodos y 6 arcos), considerando subsidios a la amortización de la inversión, a los kg de H_2 suministrados por la hidrogenera y a los subsidios por la compra de FCEV.
4. Extrapolación de los resultados obtenidos para el caso de estudio (3), a la totalidad de España.

Un quinto capítulo, donde se reflejan los principales resultados obtenidos de aplicar la metodología desarrollada en el capítulo 3 a los casos de estudio definidos en el capítulo 4. Los principales resultados obtenidos son:

- Número y capacidad de las hidrogeneras.
- Localización exacta de las hidrogeneras.
- Número de FCEV.
- kg de H_2 suministrados por las hidrogeneras.
- km recorridos por los FCEV.
- Energía renovable necesaria para generar los kg de H_2 .
- t de CO_2 ahorradas por uso de H_2 .
- Combustible fósil ahorrado, en m^3 , por uso de H_2 .
- Subsidio para amortizar la inversión de la hidrogenera, ψ^t .
- Subsidio al kg H_2 vendidos, ϕ^t .
- Subsidio a la adquisición de FCEV.

- Subsidios totales.
- Beneficios económicos menores emisiones CO_2 .
- Capacidad de suministro de H_2 de las hidrogeneras.
- Comparación de los resultados obtenidos con los planes de movilidad de los principales países europeos.
- Cuantificación económica para la introducción del H_2 como combustible alternativo.

Un sexto capítulo, en el que se abordan las principales conclusiones de la tesis doctoral.

Un séptimo capítulo en el que se indican las futuras líneas de investigación que se abordarán en el futuro inmediato, como continuación del trabajo desarrollado con la presente tesis doctoral.

Un octavo capítulo, en el que se identifican las principales publicaciones (publicadas y en revisión) realizadas durante el periodo de desarrollo de la tesis doctoral, mostrando que se ha realizado difusión de la metodología y de los resultados obtenidos.

2

Estado del arte

En este capítulo, se realiza una profunda revisión bibliográfica de diferentes artículos científicos publicados sobre la temática, para poder determinar con claridad lo que el desarrollo de la presente tesis doctoral aporta el estado del arte actual, teniendo que ser dicha aportación lo suficientemente relevante.

2.1. Revisión bibliográfica

Se ha realizado una exhaustiva búsqueda por las diferentes bases de datos de artículos científicos, para analizar las investigaciones realizadas hasta la fecha, sobre despliegue de infraestructuras de combustibles alternativos, por diferentes autores.

Posteriormente, se han analizado de forma preliminar, cada uno de los artículos científicos relacionados con el objeto de la tesis doctoral y se han seleccionado los que tienen relación con algunos de los objetivos de dicha tesis doctoral.

Del análisis preliminar, se han seleccionado los artículos científicos de mayor interés, los cuales han sido analizados y estudiados exhaustivamente, de cara a tener un conocimiento exhaustivo del estado del arte de problemas relacionados con despliegue de infraestructuras de repostaje de combustibles alternativos. A continuación, se indican los datos mas importantes de los diferentes artículos seleccionados y finalmente se realiza una tabla comparativa de cara a identificar los aportes realizados por la tesis doctoral.

Kuby and Lim (2005): El problema de localización de los puntos de repostaje en función del flujo para vehículos con combustibles alternativos. Algunos investigadores han estado desarrollando una nueva clase de modelos de localización-asignación (location-allocation) por captura de flujo (flow capturing). En vez de localizar instalaciones centrales para servir la demanda en puntos fijos del espacio, sus modelos tienen como objetivo atender la demanda que representa los flujos origen-destino por sus caminos más cortos.

Este artículo extiende los modelos de captura de flujo (flow-capturing models) a la localización óptima de instalaciones de repostaje para vehículos de combus-

tibles alternativos, tales como los de pila de combustible o los de gas natural.

Los modelos de captura de flujo existentes asumen que si un flujo encuentra una instalación en su camino, estará cubierto. Esta suposición no sirve para estos vehículos debido a su escasa autonomía.

Para repostar, puede ser necesario parar en más de una instalación con el fin de reabastecerse de combustible con éxito en todo el camino, dependiendo de la autonomía del vehículo, de la longitud del camino y de la separación de los nodos. El modelo de localización de estaciones de repostaje por capturas de flujo (Flow Refueling Location Model (FRLM)) optimiza la localización de p estaciones de carga en una red maximizando el total de volumen de flujo repostado.

Este artículo explora las propiedades básicas de los problemas discretos de repostaje-flujo cuyas localizaciones están restringidas a los nodos de la red. Además, presenta una formulación mediante programación entera mixta donde solo se consideran los nodos, así como un algoritmo para determinar todas las combinaciones de nodos que repostan un camino dado. Se demuestra que se consigue un subóptimo y que la curva de equilibrio entre las instalaciones y el volumen de flujo abastecido se muestra no convexa.

Bersani et al. (2009): Planificación de la red de abastecimiento de combustible de estaciones de servicio en un escenario competitivo a corto plazo de la economía del hidrógeno.

El hidrógeno puede ser visto como el combustible alternativo para la automoción en el futuro. Sin embargo, algunas cuestiones relativas a su uso, no han sido suficientemente investigadas. Una de estas cuestiones concierne a la logística y distribución del hidrógeno en un territorio. Un escenario a corto plazo, por ejemplo en la próxima década, es probable que incluya procedimientos de distribución que sean similares a los actualmente usados para los productos petrolíferos.

En este escenario, la conversión de estaciones de servicio petrolíferas en puntos de distribución de hidrógeno se llevaría a cabo de forma progresiva. Las compañías petroleras serían uno de los mayores productores de hidrógeno.

Las compañías petrolíferas anteriormente comentadas, tendrían que seleccionar las localizaciones más convenientes y efectivas para los puntos de distribución de hidrógeno, desde un punto de vista estándar de costes/beneficios en competencia con otras compañías que querrían ofrecer el mismo servicio en el mismo territorio. En este artículo se presenta un modelo para la planificación de una red de estaciones de servicio de una empresa determinada en un marco competitivo.

A pesar del origen común intrínseco de productos petrolíferos y de hidrógeno en el escenario a corto plazo, parece razonable, por varias razones, que los dos productos seguirán mercados independientes. En primer lugar, un sistema integrado distribución de ambos productos (gasolina e hidrógeno) en la misma estación de repostaje, no se considera factible por razones de seguridad.

Se presenta, analiza y discute un estudio de caso de un territorio específico

en el norte de Italia.

Wang and Wang (2010): Localización de estaciones de repostaje para vehículos de pasajeros. El estudio analiza el concepto de cobertura y lógica de repostaje de vehículos para proponer un modelo híbrido con doble objetivo, usando un método de programación entera mixta, para situar estaciones de repostaje que sirvan simultáneamente a viajes urbanos e interurbanos (intra e interciudad).

El modelo puede ser aplicado para planificar una red de estaciones de repostaje para países emergentes o para mercados monopolistas de combustibles alternativos para vehículos. Del estudio de un caso real, los factores de autonomía del vehículo y cobertura son identificados como los de mayor importancia en la solución. Basados en soluciones no inferiores (non inferior solutions), los que tienen que tomar las decisiones pueden formular mejores planes de desarrollo de estaciones de servicio.

La formulación del modelo se centra en el emplazamiento de estaciones de repostaje para viajes interurbanos (long-distance) entre grandes ciudades y simultáneamente cubrir los viajes urbanos (intra-city(short-distance)). Para evitar el problema de doble contabilidad y la canibalización resultante de la introducción de los flujos en los arcos, los flujos en los viajes interurbanos se realizan por los caminos mínimos entre las ciudades consideradas, y se asume que la capacidad de servicio de cada estación es ilimitada. Esto es, para un flujo de larga distancia en una red desde un nodo origen i a un nodo destino j a través del camino más corto, el viaje puede ser completado mediante la ampliación de la autonomía mediante repostaje en cada nodo por el que se pasa.

También se asume que la demanda de viajes en una ciudad se concentra en el centro de la ciudad (nodo) y se usa una distancia predeterminada de cobertura (s) para decidir si una estación puede servir la demanda del nodo. Esto es, se asume que allí existe una demanda conocida, a_i , en el nodo i de la red, y que la demanda en este nodo es satisfecha si el camino le entra directamente, o si el camino entra en algún otro nodo, digamos j , tal que el nodo j esté en la distancia de cobertura de s . Además, se realizan otras muchas otras suposiciones para establecer el modelo, incluyendo un tipo único de vehículos con combustible alternativo con autonomía uniforme, una relación lineal entre el combustible consumido y la distancia recorrida y que cada vehículo dispone de la misma cantidad de combustible en el punto de origen.

En las conclusiones se pone de manifiesto que se presenta un modelo de localización con dos objetivos: minimizar los costes y conseguir una máxima cobertura basado en los conceptos de cobertura de un conjunto y en la lógica de repostaje de vehículos, para económicamente determinar el número de estaciones y sus localizaciones para servir los viajes de larga y corta distancia con autonomía de los vehículos limitada. En general, cuanto más grande es la autonomía de los vehículos o la distancia de cobertura, menor es el número de estaciones que serían necesarias para cubrir una población específica.

Stephens-Romero et al. (2010): Planificación sistemática para optimizar las inversiones en el desarrollo de hidrogeneras. Este estudio utiliza una metodología ingenieril conocida como (Spatially and Temporally Resolved Energy

and Environment Tool - STREET). Herramienta para resolver problemas sobre energía y medioambiente en el tiempo y en el espacio para demostrar como la planificación sistemática puede optimizar las tempranas inversiones en infraestructuras de hidrógeno para apoyar y alentar el despliegue de los vehículos de hidrógeno, garantizando al mismo tiempo beneficios para el medioambiente y la seguridad energética.

Específicamente se ha estudiado el caso de la ciudad de Irvine (California), para optimizar el número y la localización de las hidrogeneras necesarias, para proporcionar un puente a la comercialización de vehículos de hidrógeno, la estrategia de despliegue para estas estaciones, y el impacto ambiental asociado con tres escenarios a corto, medio y largo plazo, para la producción y distribución de hidrógeno asociada con las fuentes locales y regionales de hidrógeno, disponibles en la ciudad.

El resultado muestra que se requieren significativamente menos hidrogeneras para proporcionar un servicio comparable a la infraestructura de gasolina existente, y que las claves estadísticas de la comunidad son necesarias para determinar la mejor estrategia para el despliegue de las hidrogeneras.

El procedimiento que se utiliza es el siguiente:

1. Se estima el parque de vehículos mediante estudios existentes.
2. Se estima el consumo de H_2 según el parque de vehículos.
3. Mediante técnicas de análisis de cobertura, se calcula el número mínimo de hidrogeneras y su localización, asegurándose que tienen igual tiempo mínimo de viaje que las gasolineras actualmente existentes.

Brey et al. (2012): Uso de un proceso analítico jerárquico (Analytic Hierarchy Process - AHP) y de programación entera binaria para optimizar la distribución inicial de las hidrogeneras en Andalucía.

En este trabajo se utiliza el proceso analítico jerárquico para clasificar, en base a criterios de suministro, demanda y aspectos ambientales, los más de 770 municipios de Andalucía en función de su idoneidad para el establecimiento de hidrogeneras. Posteriormente, se incorpora este resultado en un problema de optimización para conseguir la planificación óptima del número y localización de hidrogeneras que den cobertura a Andalucía.

La mayoría de los estudios de localización óptima de las estaciones existentes, se centran principalmente en proporcionar una adecuada cobertura a todos los residentes. Este concepto de optimalidad es demasiado restrictivo porque omite otros aspectos que pueden modificar la priorización de unas regiones sobre otras.

En la literatura sobre planificación de la infraestructura se pueden distinguir dos grupos.

- Trabajos que intentan solamente determinar el número de hidrogeneras requerido para permitir el despegue de los vehículos de hidrógeno.

- Trabajos focalizados en la planificación óptima de la localización geográfica de las hidrogeneras. La mayoría de estos estudios usan gasolineras existentes para determinar las posibles localizaciones y utilizan su accesibilidad (normalmente medida como la media del tiempo de viaje de cada residente necesita para llegar a una hidrogenera) como criterio de localización de las hidrogeneras.

Este trabajo tiene por objetivos:

- Priorizar los 770 municipios de Andalucía considerando su susceptibilidad para el despliegue de vehículos de hidrógeno. Este ranking proveerá información para los decisores sobre los municipios potenciales que habría que considerar en una primera fase del proceso.
- Determinar el mínimo número de hidrogeneras en Andalucía para romper el círculo vicioso del problema del huevo y la gallina, esto es, el número de estaciones requerido para dar la idea a los compradores de vehículos de hidrógeno, de que hay suficientes hidrogeneras.
- Localizar las hidrogeneras de forma óptima a través de Andalucía.
- Llevar a cabo toda esta planificación, de acuerdo con los criterios establecidos en el PASENER 2007 - 2013 en relación con la reducción de emisión de CO_2 , la diversificación de las fuentes de energía, y el desarrollo territorial equilibrado de Andalucía.

Lo estos autores realizan es lo siguiente:

- Realizan una priorización de los municipios de Andalucía a la hora de implantar hidrogeneras. Para ello tienen en cuenta:
 - Criterios de demanda: Número de vehículos registrados en cada municipio, kilómetros de carreteras regionales y nacionales, renta per capita de cada municipio.
 - Criterio de existencia de energías renovables
 - Criterios medioambientales
- Planifican de forma óptima la red de hidrogeneras de Andalucía para un estado avanzado de introducción del vehículo de hidrógeno en Andalucía, determinando el mínimo número necesario para romper el problema del huevo y la gallina y posicionándolas geográficamente tomando como nodos donde instalarlas los municipios anteriormente baremados. Resuelven el problema de optimización mediante simulado recocido.

Kim and Kuby (2012): Modelo para la localización de repostaje de flujo por desviación para optimizar una red de estaciones de repostaje - DFRLM. Esta investigación desarrolla y aplica un modelo de programación lineal entera mixta, que optimiza la ubicación de las estaciones de servicio teniendo en cuenta

no sólo la autonomía de los vehículos, sino también las desviaciones necesarias que los conductores puedan hacer de su caminos más cortos con el fin de abastecer de combustible a sus vehículos cuando la red de estaciones de repostaje es escasa. El modelo DFRLM localiza instalaciones para maximizar los flujos totales reabastecidos de combustible en rutas de desviación.

La demanda de flujo capturado por las estaciones se supone que disminuirá, a medida que la desviación que los conductores deben hacer aumente. Los resultados de las pruebas indican que la desviación máxima admisible y la función de penalización específica de la desviación tienen efectos que se pueden medir sobre la localización óptima de las instalaciones y sobre los valores de la función objetivo.

Estos autores tienen en cuenta la desviaciones que pueden tomar los conductores para repostar y las autonomías de los vehículos al mismo tiempo.

En la literatura, los modelos para la estimación de la demanda de hidrógeno pueden ser agrupados en 5 categorías de acuerdo con el método de modelización empleado:

- Modelos de elección de logística.
- Modelos de cadena de suministro.
- Modelos de simulación de sistemas dinámicos.
- Enfoques basado en Sistemas de Información Geográfica (GIS).
- Modelos de localización de instalaciones mediante investigación operativa.

La mayoría de los estudios basados en la optimización para localizar estaciones de servicio, se dividen en dos grupos, en función de la geometría de la representación de la demanda, siendo estos grupos son los siguientes:

- Modelos de demanda basados en puntos.
- Modelos de demanda basados en flujos.

Para mejorar la solución de los FRLM (Flow Refueling Location Model), Kuby and Lim (2005) propusieron métodos para añadir localizaciones candidatas a lo largo de los arcos.

El aspecto clave de este trabajo es relajar la hipótesis de los modelos de localización por repostaje de flujo, de que los clientes no se desvían de sus viajes previamente planeados para repostar sus vehículos.

Esto se cree que refleja mejor el comportamiento de los conductores cuando la red de repostaje es escasa y cuándo la desviación requerida hasta la instalación es aceptable. Se asume que el número de clientes que están dispuestos a desviarse de su camino previamente fijado disminuye según una función que depende de la distancia de desvío ¹. El objetivo del nuevo modelo, Deviation-Flow

¹Distancia de desviación = Distancia del camino con desviación - Distancia del camino mínimo

Refueling Location Model (DFRLM), es localizar p instalaciones para maximizar el número esperado de viajes potenciales que utilizan vehículos de limitada autonomía que puede ser repostado en las instalaciones.

Una entrada importante para el nuevo modelo, son todos los caminos con desviación entre los pares origen-destino. Dado que el problema de encontrar todos los posibles caminos entre un par origen-destino en una red real es duro de resolver, la generación de caminos de desviación factibles requiere restricciones adicionales, para reflejar de forma más realista hipótesis sobre el comportamiento de los conductores para repostar en redes de repostaje dispersas. Además, sin disponer de datos empíricos sobre como algunos conductores se desviarían de sus caminos predeterminados y como de lejos ellos irían para repostar, se requiere un modelo exploratorio.

Con tal modelo, los planificadores podrían llevar a cabo experimentos con diferentes límites superiores para la distancia de desviación, o aplicar diferentes formas funcionales para ajustarse a la forma en que los conductores dispuestos a desviarse disminuyen cuando aumenta la distancia de desviación.

Finalmente, todas las extensiones de este modelo necesitan considerar la autonomía del vehículo al mismo tiempo. Kuby and Lim (2005) apuntaron que las escasas autonomías de los vehículos requieren que el conductor no solo sea capaz de ir a su destino sin quedarse sin combustible, sino que también debe poder volver.

Hipótesis:

- Caminos de desviación mínimos.
- El volumen de flujo decrece con el incremento de la desviación y existe un límite de distancia de desviación que los conductores pueden tolerar.
- Hipótesis comunes a los modelos de localización por repostaje de flujos:
 - Se formulan para localizar instalaciones que hacen factibles los viajes de ida y vuelta.
 - El nivel de partida de combustible de un vehículo es la mitad del depósito, que asegura que ida y vuelta será factible y repetible.
 - El consumo de combustible es estrictamente función de la distancia.
 - La localización de las instalaciones se limita a los nodos de la red. Se podrá extender el DFRLM para añadir localizaciones candidatas a lo largo de los arcos como se hace en las extensiones del FRLM.

Capar et al. (2013): Cobertura y análisis estratégico para la localización de estaciones de combustibles alternativos. En este estudio se presenta una nueva formulación del modelo de localización generalizado de repostaje de flujos, que tiene en cuenta la autonomía de los vehículos y los viajes entre pares origen-destino. La nueva formulación, basada en cubrir los arcos que componen cada camino, es computacionalmente más eficiente que las formulaciones previas o heurísticas.

A continuación, se usa la nueva formulación para proporcionar nuevas perspectivas de gestión para algunas de las preocupaciones claves de la industria, como por ejemplo, si el despliegue de las infraestructuras debe focalizarse en grupos localizados de instalaciones que sirvan regiones independientes o conectar estas regiones por redes de instalaciones, cuál es el impacto de la incertidumbre en la previsión de la demanda origen-destino, si la ubicación de las instalaciones se mantiene óptima a medida que aumenta la autonomía de los vehículos, y si los desarrolladores de infraestructura deben estar dispuestos a pagar más por las estaciones en las intersecciones de mayor costo. Los experimentos con conjuntos de datos reales y aleatorios son alentadores para la industria, de la misma forma que las ubicaciones óptimas tienden a ser robustas bajo diversas condiciones.

Este estudio está relacionado con algunas corrientes de investigación sobre localización óptima de instalaciones como por ejemplo problemas de la p-mediana, máxima cobertura, network interdiction, sensor de red, interceptación de flujo, y repostaje de flujo.

- El modelo p-mediana minimiza la distancia total ponderada viajando desde cada nodo de demanda hasta la instalación más cercana.
- El objetivo del problema de localización de máxima cobertura (Max covering location problem - MCLP) es localizar p instalaciones en una red mientras que se maximiza el total de población en los nodos estacionarios cubiertos por las instalaciones localizadas dentro de una distancia o tiempo de viaje dados.
- El problema de localización por interceptación de flujo (Flow-intercepting location problem - FILP), localiza instalaciones para servir flujos de tráfico que pueden ser interceptados o capturados si el flujo comienza, termina, o pasa por una instalación abierta. Kuby and Lim (2005) señalan que el FILP no es aplicable a vehículos cuya autonomía es menor que la longitud del viaje a realizar. Ellos introdujeron el flow-refueling location problem (FRLP) el cual explícitamente tiene en cuenta la autonomía de los vehículos y localiza p instalaciones para maximizar el flujo de tráfico capturado.
- El FRLM tiene similitudes y diferencias con sensores de red y con problemas de intersección. En los problemas de localización en sensores de redes, el objetivo involucra conteos o identificaciones de objetos en movimiento a través de la red. Se han estudiado diferentes tipos de sensores y su aplicación a diferentes problemas.

El objetivo de los FRLP es la localización de p instalaciones en una red para maximizar el flujo de tráfico repostado dada la autonomía de los vehículos. Se considera que un flujo de tráfico es repostado, si los vehículos comienzan en el origen, llegan al destino y retornan al origen sin quedarse sin gasolina.

Suposiciones del modelo:

1. El tráfico entre un par origen-destino fluye a través de un único camino (camino mínimo).

2. El volumen de tráfico entre los pares origen-destino es conocido de antemano.
3. Los conductores tienen total conocimiento de la localización de las hidrogeneras a lo largo de sus caminos y repostan cuando lo necesitan para completar exitosamente sus viajes de ida y vuelta.
4. Solo se consideran los nodos como posibles localizaciones de las infraestructuras de repostaje de hidrógeno o hidrogeneras.
5. Los vehículos tienen la misma autonomía.
6. El consumo es directamente proporcional a la distancia recorrida.

Kuby and Lim (2005) mostraron que las instalaciones a lo largo de los arcos podrían ser interesantes, solo si la autonomía de los vehículos es corta comparada con la longitud de los arcos de la red, y consecuentemente localizar en arcos no tendrá significativos efectos sobre la red real de transporte salvo en áreas remotas.

Respecto a como lleva el depósito al comienzo del viaje se han formulado varias hipótesis: Kuby and Lim (2005) parten con el depósito medio. Sin embargo en este artículo se parte con lo que ha sobrado de realizar el mismo viaje.

El objetivo del AC-PC FRLM es maximizar el volumen de tráfico de ida y vuelta servido. La principal innovación de esta nueva formulación estriba en la restricción (2), la cual permite que el FRLP sea formulado sin usar una combinación de instalaciones, lo que le hace más eficiente computacionalmente.

Hoen and Koetse (2014): Modelo de elección en las preferencias de los propietarios de los vehículos privados de combustible alternativo en Holanda. Este artículo presenta los resultados de un experimento de elección sobre las preferencias de los propietarios Holandeses de coches privados para vehículos de combustibles alternativos y sus características. Los resultados muestran que las reticencias para los vehículos de combustibles alternativos son grandes, especialmente para los eléctricos y los de pila de combustible, la mayoría como resultado de sus limitadas autonomías y los considerables tiempos de repostaje. Las reticencias por los vehículos de combustibles alternativos se disminuyen considerablemente con las mejoras en la autonomía, el tiempo de repostaje y la disponibilidad de combustibles. Las reticencias, sin embargo, permanecen también con sustanciales mejoras en las características de los vehículos de combustibles alternativos, siendo la diferencia en precios para aceptar esta nueva tecnología entre 10 a 20 mil dólares por vehículo de combustible alternativo.

Los resultados de un modelo logit mixto muestran las preferencias de los consumidores por los vehículos alimentados por combustibles alternativos y que las características de los vehículos alimentados por combustibles alternativos son heterogéneas, en gran medida. En particular para los vehículos eléctricos, el tiempo de desvío adicional y el tiempo de repostaje son los aspectos de mayor importancia. Un modelo de interacción revela que el kilometraje anual es, de lejos, el factor que tiene mayor ponderación y que por tanto determina la heterogeneidad en las preferencias por el coche eléctrico y el de hidrógeno.

Cuando el kilometraje anual se incrementa, la preferencia por el coche eléctrico y de hidrógeno decrece sustancialmente, mientras que la disposición a pagar por autonomía se incrementa sustancialmente. Otras variables tales como el uso del coche para vacaciones en el extranjero y los desplazamientos diarios también aparecen como relevantes para elegir vehículo.

El principal objetivo es obtener información de las preferencias de los propietarios de vehículos privados en los Países Bajos para vehículos alimentados por combustibles alternativos, de cara a descubrir las características del vehículo que afectan a estas preferencias, y para saber hasta qué punto estas características tienen que cambiar con el fin de igualar las preferencias de los consumidores entre los vehículos convencionales y los vehículos alimentados por combustibles alternativos. Se trata de identificar las características socio-demográficas de los compradores de vehículos que son actualmente los más dispuestos a adquirir un vehículo de combustible alternativo con el objetivo de descubrir interesantes segmentos de mercado y potenciales primeros compradores.

Este estudio tiene valor debido fundamentalmente a los siguientes aspectos:

- Incluye todos los vehículos alimentados por combustibles alternativos que son actualmente considerados como opciones viables para la sustancial reducción de las emisiones de CO_2 . En este estudio se incluyen un gran número de atributos de los vehículos. Se trata por tanto, de un estudio amplio, que permite estimaciones más precisas y fiables sobre el impacto de las diferentes medidas políticas (fijación de precios) en materia de adopción de vehículos alimentados por combustibles alternativos y las emisiones de CO_2 .
- Los resultados de los estudios muestran diferencias sustanciales en las preferencias declaradas para los vehículos alimentados por combustibles alternativos tanto entre como dentro de los países, por lo que las conclusiones para un país no son extrapolables a otros, siendo necesario un experimento específico para cada país. El caso holandés puede ser de particular interés ya que es potencialmente más adecuado para estos vehículos con autonomía limitada debido a sus características espaciales particulares. Las ciudades más grandes son relativamente pequeñas (400.000-700.000 habitantes), concentrados en un área relativamente pequeña (alrededor de 100 kilómetros cuadrados), que incluye ciudades de tamaño medio y pueblos, los cuales están conectados por una red relativamente densa de carreteras.
- En tercer lugar, en el experimento de este estudio, se optó por incluir la tecnología actual (gasolina, diésel y GLP) en sólo un subconjunto de las opciones de elección. Se estiman modelos tanto en la muestra completa y la submuestra. Mediante la comparación de los resultados para estas dos muestras, se pueden evaluar los efectos de la inclusión de una opción de status quo (es decir, la tecnología actual). Más importante aún, es la capacidad de analizar las diferencias en la disposición marginal a pagar (WTP) y el potencial mercado de los vehículos alimentados por combustibles alternativos en el corto plazo, con vehículos de gasolina, diésel y GLP como tecnología actual, como a largo plazo, en el que los vehículos de gasolina, diésel y GLP pueden haber sido reemplazados.

- En cuarto lugar, se hace una distinción entre los compradores de vehículos nuevos y de segunda mano. Las preferencias de los compradores de vehículos de segunda mano son muy diferentes a las preferencias de los compradores de vehículos nuevos. Esto es especialmente relevante, si se tiene en cuenta, que en la actualidad, como resultado de la beneficiosa normativa fiscal, la mayoría de los vehículos de combustible alternativo vendidos en los Países Bajos, son vehículos de empresa que va a entrar en el mercado privado de segunda mano en 3-4 años.

Selección y determinación de los niveles de los atributos. Los hallazgos de la literatura existente sobre las preferencias de los vehículos alimentados por combustibles alternativos, muestran que los de mayor importancia son el precio de compra, los costes de operación, autonomía, tiempo de recarga y la disponibilidad de combustible. La reducción de emisiones también se señala como un factor importante. Aunque el estudio de Beck et al. (2011) no se fija en los vehículos alimentados por combustibles alternativos específicamente, sus hallazgos muestran que los índices de emisión pueden tener efectos sustanciales sobre las decisiones de compra de vehículos. Con estos hallazgos y mediante consultas a expertos y encuestas a usuarios se seleccionaron los siguientes atributos:

1. Tipo de coche: convencional (gasolina, diésel o LPG), híbridos, híbridos enchufables, hidrógeno, eléctricos y flexifuel car.
2. Precios de compra.
3. Costes mensuales que incluyen combustible, mantenimiento y peajes.
4. Autonomía.
5. Tiempo de recarga/repostaje.
6. Tiempo de desvío adicional para el repostaje.
7. Número de marcas y modelos disponibles.
8. Medidas políticas: (i) Aparcamiento gratuito, (ii) Acceso a los carriles de autobús dentro de las ciudades, (iii) Exención del impuesto de circulación.

Conclusiones Los resultados muestran que, en promedio y asumiendo las características actuales de los vehículos alimentados por combustibles alternativos, las preferencias por dichos vehículos son sustancialmente inferiores a las de la tecnología convencional. Autonomía limitada, largos tiempo de recarga y la limitada disponibilidad de oportunidades de abastecimiento de combustible, son en gran medida responsables de esto. Estas barreras son las más importantes para el coche eléctrico, y en menor medida para el coche de pila de combustible. Las preferencias para el uso de vehículos alimentados por combustibles alternativos aumentan considerablemente si se mejora la autonomía, el tiempo de repostaje de combustible y el tiempo de desvío adicionales. Un aumento en el número de modelos disponibles para que el consumidor pueda elegir y medidas

tales como parking gratuito, pueden tener un efecto positivo, pero en un grado mucho menor.

Los resultados también muestran que los compradores de automóviles de segunda mano son aproximadamente dos veces más sensibles a los precios que los compradores de vehículos nuevos, mientras que las preferencias para otros niveles de atributos son muy comparables entre los compradores de coches nuevos y de segunda mano. Por lo tanto, la voluntad de pagar (WTP) para disponer de un mayor rango de autonomía para el vehículo de pila de combustible y el eléctrico es similar para los compradores de vehículos nuevos y de segunda mano. Esto es inesperado si se tiene en cuenta que los vehículos más viejos son normalmente menos utilizados que los vehículos nuevos.

Por lo tanto, se esperaría mayor WTP de los conductores de vehículos de segunda mano, que en los compradores de automóviles nuevos, para los vehículos eléctricos y de pilas de combustible. Estos resultados implican que la adopción de los vehículos de pila de combustible y eléctricos es probable que sea similar para el mercado de coches nuevos y de segunda mano.

Si asumimos que el comportamiento de los vehículos de combustibles alternativos aumenta sustancialmente en términos autonomía, tiempo de recarga/repostaje, tiempo de desvío adicional y el número de modelos disponibles, las preferencias negativas para todos los vehículos de combustibles alternativos permanecen. La exención del impuesto de circulación holandés para los vehículos de combustible alternativo se suma a la WTP, pero es insuficiente para superar las preferencias negativas intrínsecas.

La heterogeneidad sustancial en las preferencias y las reticencias intrínsecas para el uso de vehículos alimentados por combustibles alternativos encontrados en este estudio, sugieren que las políticas dirigidas a grupos específicos pueden ser más eficaces en la aceleración de la adopción de este tipo de vehículos que las medidas de política vehículos de combustibles alternativos genéricas. Los responsables políticos deben ser especialmente conscientes de que los usuarios de automóviles con kilometrajes anuales bajos es probable que sean los primeros en adoptar este tipo de vehículos.

Las diferencias de precio de compra entre los vehículos convencionales y los vehículos de combustible alternativo, hacen que los subsidios se deben emplear para los vehículos alimentados por combustibles alternativos, en especial para el vehículo eléctrico de pila de combustible alimentado por hidrógeno.

La fuerte reticencia debida a la autonomía limitada (y en menor medida los largos tiempos de recarga), implica que los responsables de las políticas, pueden querer centrarse en el desarrollo de la mejora de la tecnología de la batería y de la recarga rápida.

Los resultados de esta investigación muestran, además, que en las circunstancias actuales los consumidores consideran el vehículo eléctrico como la elección menos apetecible de entre los vehículos alimentados por combustibles alternativos. En línea con el clamor que se escucha a menudo de que la neutralidad tecnológica es un requisito previo para políticas eficaces, este hallazgo sugiere

que las políticas actuales de, entre otros, los Países Bajos, Francia y Alemania, que se dirige específicamente a estimular la adopción de coche eléctrico, pueden ser subóptima y requieren una perspectiva tecnológica más amplia.

Kim and Kuby (2013): Aproximación heurística para la transformación de la red para el modelo de localización con desviación de flujos para el repostaje. En las primeras etapas de desarrollo, los vehículos de combustible alternativo tienden a tener autonomías más cortas que los vehículos convencionales, y la disponibilidad de las estaciones será limitada. Dadas estas condiciones, es importante tener en cuenta la voluntad de los conductores a desviarse hasta cierto punto de sus trayectorias más cortas para repostar sus vehículos y completar sus viajes. Se propone un modelo de localización para el repostaje de flujos con desviación (DFRLM) para la localización de un determinado número de instalaciones de abastecimiento de combustible para maximizar los flujos de vehículos de combustibles alternativos totales que pueden ser reabastecidos por los conductores que viajan o se desvían de su caminos más cortos. En un problema del mundo real, sin embargo, el gran número de posibles desviaciones de cada camino y las combinaciones de las instalaciones que pueden cubrir cada ruta harían extremadamente difícil generar y resolver la formulación entera mixta.

En este trabajo se desarrollan algoritmos heurísticos para la DFRLM, que superan esta dificultad a través de la transformación de red. Específicamente, una heurística glotona construye y edita una red viable artificial en la cual cada nodo representa una estación, origen o destino, y cada arco representa un camino posible entre dos nodos dados considerando la autonomía de los vehículos. En cada paso del algoritmo goloso, la red factible se edita y se aplica un algoritmo de caminos mínimos, el cual determina si cada viaje de ida y vuelta entre origen y destino puede ser completado. Este método permite que cualquier posible desvío pueda ser tomado (hasta algunos definidos por el usuario máximo) al mismo tiempo garantizar que los conductores toman el desvío posible más corto.

Brey et al. (2014): Análisis de una estrategia de despliegue de hidrogeneras para introducir el vehículo de hidrógeno en Andalucía. La distribución de hidrogeneras, en número suficiente para cubrir la demanda inicial y para satisfacer los diferentes escenarios de despliegue, ha sido tratado por diferentes autores, en diferentes países, y con diferentes métodos y aproximaciones. En este trabajo, se utiliza un enfoque espacial para estudiar la posibilidad de una estrategia de despliegue secuencial desde el momento actual hasta el año 2030 para Andalucía. En cada etapa, se identifican los principales nodos y clústeres para examinar en que áreas de esta región debe comenzar la puesta en marcha de estaciones de servicio que incluyan el hidrógeno como combustible alternativo. Por último, se estima el número y tamaño de las hidrogeneras para cada etapa, así como la inversión requerida para el despliegue de esta infraestructura, sobre la base de los costos estimados para cada tipo de hidrogenera durante el periodo de tiempo anteriormente comentado.

Se fija un objetivo de población cubierta para el 2030 (el 30 % de la población de Andalucía para el 2030). Posteriormente se realiza un ranking de poblaciones donde deberían existir hidrogeneras con más prioridad y se fija un % de población a cubrir en cada etapa. Por ejemplo, para la primera etapa, para un

porcentaje de cubrimiento del 8 %, se seleccionan como nodos principales Córdoba, Jerez y Sevilla y como nodos de conexión Carmona y Ecija. En los nodos principales localizan un mínimo de 2 hidrogeneras y en los de conexión 1 hidrogenera. Y así sucesivamente. Luego calculan el coste de las inversiones teniendo en cuenta el tipo de hidrogenera necesaria.

Por otra parte, el procedimiento sistematizado propuesto, evita una inadecuada puesta en marcha de la infraestructura (en base a la conveniencia o la existencia de subvenciones) que daría lugar a innecesarios costos y esfuerzos.

La información obtenida de la aplicación de este procedimiento será útil para informar sobre el diseño de políticas fiscales, políticas económicas y sociales que pueden promover la migración a este nuevo paradigma de energía y, sobre todo, para comparar los ahorros respecto de la situación actual, difícilmente sostenible, basada en los combustibles fósiles.

Brey et al. (2014): Puesta en marcha de estaciones de servicio de abastecimiento de hidrógeno en España a través de un procedimiento basado en análisis envolvente de datos. Varios fabricantes de automóviles han manifestado su intención de iniciar la comercialización de vehículos alimentados por hidrógeno a gran escala en 2015. Esta comercialización requiere un eficiente despliegue de infraestructuras de repostaje de hidrógeno, con la determinación previa de las zonas más adecuadas para su establecimiento. La idoneidad de las diferentes áreas será determinado por criterios de suministro, de demanda y ambientales. En este artículo, en el caso de España, se aplica una metodología basada en el análisis envolvente de datos para seleccionar los municipios correspondientes para el establecimiento de infraestructuras de repostaje de hidrógeno en las primeras etapas de la implementación del proceso. Esta metodología tiene la ventaja de reducir la subjetividad en el proceso de agregación de criterios para la selección de los municipios.

Determinan el grado de idoneidad de los municipios aplicando los siguientes criterios:

■ **ABASTECIMIENTO:**

- Disponibilidad de red de gas natural en la localidad. Solo 1373 municipios la tenían en 2012.
- Disponibilidad de estaciones de servicio tradicionales donde se venderá conjuntamente el hidrógeno con las gasolinas y gasóleos. Solo 2012 municipios.

La aplicación de estos dos criterios reduce el número de municipios potencialmente idóneos de 7959 a 1104.

■ **DEMANDA:**

- Número de vehículos.
- Número de estaciones de servicio.
- Número medio de años de educación de los residentes del municipio.
- Número de instituciones financieras en el municipio.

- Nivel de polución.

Después, para clasificar los municipios en base a su idoneidad, se agregan los anteriores criterios en una única medida, dando un peso relativo a cada uno. Para asignar el peso de cada criterio existen muchos procedimientos, los cuales, se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- PESOS SUBJETIVOS, dados por uno o más de los responsables de la toma de decisiones.
- PESOS OBJETIVOS, obteniéndose a partir de los datos en sí, con la inclusión/consideración a ser posible, de las restricciones técnicas o subjetivas.

En este trabajo se utiliza un procedimiento de asignación de pesos objetivos, basado en el análisis envolvente de datos (Data Envelopment Analysis (DEA)) y la opinión de determinados expertos.

Con todo ello seleccionan para una primera etapa 20 municipios, 30 para una segunda etapa, 50 para una tercera etapa y 100 para una cuarta etapa. Los primeros siempre están incluidos en los segundos. Los autores indican que el concepto de adecuación para la instalación de una hidrogenera no es estático. Los criterios elegidos pueden ser válidos para una primera fase de desarrollo pero no para fases sucesivas.

Tabla resumen artículos revisados

En la tabla 2.1, se resumen los trabajos revisados y se identifica cuales de los puntos que afectan a la problemática planteada por la presente tesis doctoral abordan (modelización del tráfico, modelización del comportamiento del usuario de vehículos, modelización del comportamiento de los propietarios de las hidrogeneras, modelización de la cobertura y la aproximación), definiendo el tipo de modelo seguido principalmente en cada uno de los puntos.

Una vez analizada la tabla 2.1, se puede observar que no existen trabajos en la literatura que aborden conjuntamente todos los elementos señalados.

En esta tesis doctoral, se propone un modelo de equilibrio de Stackelberg para diseñar y evaluar políticas óptimas de subsidios para el favorecimiento del despliegue de la infraestructura H_2 que considera los 5 elementos antes mencionados.

Conclusiones. Después de realizar una exhaustiva revisión del estado del arte, se puede afirmar, que no existen trabajos publicados sobre cómo llevar a cabo esta estrategia, es decir, decidir dónde y cuándo se deben instalar las infraestructuras de repostaje de hidrógeno o hidrogeneras y cuándo, cuantos y qué tipo de subsidios se han de programar para que, desde el año 2016 al año 2045, se cumpla con lo establecido en la Directiva Europea sobre combustibles alternativos, referente a la existencia de infraestructuras de repostaje de hidrógeno.

Los trabajos existentes tratan de forma parcial el problema, analizando un número limitado de aspectos y asumiendo simplificaciones restrictivas del problema.

Referencia	Model tráfico ^a	Comport usuarios vehíc H ₂ ^b	Comport propietarios hidrogeneras ^c	Cobertura ^d	Aproximación ^e
Kuby and Lim (2005)	RMC	DI	MN	-	PEM
Bersani et al. (2009)	MG	DI	MC	-	PEM
Wang and Wang (2010)	RMC	DI	MN	CF	PEM
Stephens-Romero et al. (2010)	RMC	DI	MN	GE	AC
Brey et al. (2012)	RMC	DI	MN	CF	PAJ/PEB
Kim and Kuby (2012)	RMC	DI	MN	- PEM	
Capar et al. (2013)	RMC	DI	MN	-	PEM
Hoen and Koetse (2014)	-	MLM	-	-	MLM
Kim and Kuby (2013)	RMC	DI	MN	PEM	
Brey et al. (2014)	-	DI	MN	CF	-
Brey et al. (2014)	-	DI	MN	CF	AED

Tabla 2.1: Revisión bibliográfica localización estaciones de repostaje de hidrógeno.

^a (RMC) Ruta mas corta; (MG) Modelo gravitacional.

^b (DI) Demanda Inelastica

(MLM) Modelo logit mixto.

^c (MN) Monopolio; (MC) Mercado Competitivo

^d (CF) Cobertura fija; (GE) Gasolineras existentes

^e (PEM) Programación entera mixta (PEB) Programación entera binaria; (AC) Análisis de cobertura; (PAJ) Proceso analítico jerárquico; (MLM) Modelo Logit Mixto; (AED) Análisis envolvente de datos

2.2. Aportaciones de la tesis doctoral

Las principal aportación de la presente tesis doctoral, es la definición y establecimiento de una metodología para el despliegue de infraestructura de combustibles alternativos. Se trata de una metodología que considera todos los aspectos de forma conjunta (modelización del tráfico, modelización comportamiento usuarios vehículos, modelización comportamiento dueños infraestructuras de repostaje de combustible, modelización de la cobertura y modelización de los subsidios), teniendo la peculiaridad de que se trata de un modelo dinámico, en cual se ejecuta y realimenta para cada periodo de tiempo t , que se considera igual a un año.

Esta metodología es aplicable a diferentes tipos de infraestructuras de repostaje de combustibles alternativos y a diferentes países, sin mas que utilizar los datos concretos de cada país y de cada combustible alternativo.

Permite la realización de análisis de sensibilidad de los diferentes parámetros que forman parte de cada uno de los modelos, de forma que se puede determinar el impacto de cada uno de ellos en el resultado final. En la presente tesis doctoral, se realiza el análisis de sensibilidad del atributo precio de venta del vehículo eléctrico de pila de combustible alimentado por hidrógeno.

La metodología para el despliegue de infraestructuras de repostaje de combustibles alternativos, es ejecutada mediante programación de algoritmos heurísticos mediante MATLAB, disponiendo de diferentes submodelos que tratan los

diferentes aspectos de interés que tienen una influencia directa en el despliegue de infraestructuras de repostaje de combustibles alternativos. Los submodelos utilizados son los siguientes:

- Modelización del tráfico. Primeramente se modeliza la red de carreteras utilizadas para realizar los desplazamientos mediante las matrices origen-destino y la obtención de los caminos mínimos y posteriormente se modeliza donde viaja cada usuario de cada uno de los nodos o ciudades considerados en el estudio en cada periodo de tiempo t .
- Modelización de la venta de diferentes tipos de vehículos (eléctricos, diésel, Gas Natural Comprimido e Hidrógeno) en cada uno de los nodos o ciudades de estudio y para cada periodo de tiempo t .
- Modelización de la cobertura para un usuario de cada nodo o ciudad considerada en el estudio para cada periodo de tiempo t . La cobertura se define como la distancia máxima a la que un usuario dispone de una infraestructura de repostaje de combustible alternativo.
- Modelización del comportamiento de la infraestructura de repostaje de combustible alternativo. Se modela los beneficios que obtiene para cada periodo de tiempo t y en función de los beneficios obtenidos, toma decisiones de incorporar o no el hidrógeno como combustible alternativo. Todo ello se realiza mediante un modelo de competencia, llamado equilibrio de Stackelberg, en el cual el líder (en nuestro caso el estado) define unas políticas referente a combustibles alternativos, y los seguidores (cada una de las estaciones de repostaje de combustibles alternativos) pelean entre ellos para maximizar su beneficio.
- Definición de políticas de subsidios. Se definen diferentes políticas de subsidios (los cuales son necesarios inicialmente para el despliegue de la infraestructura de repostaje de combustibles alternativos) con el objetivo de que en un periodo de tiempo razonable (cuando se haya generado un mercado) dichos subsidios se retiren y las infraestructuras de repostaje de combustibles alternativos puedan funcionar sin necesidad de subsidios. Como es lógico, siendo dichos subsidios serán decrecientes en el tiempo hasta que desaparezcan.

El modelo recoge el comportamiento de los diferentes actores del proceso (estado Español, propietarios de estaciones de repostaje de combustible y propietarios de los vehículos alimentados por combustibles alternativos) en un contexto dinámico y de competencia entre las estaciones de repostaje. El aspecto de competencia es novedoso en la literatura, ya que en la mayoría de los trabajos revisados en bibliografía, se asume una localización coordinada, es decir, un monopolio en la propiedad de las estaciones de repostaje de combustibles alternativos o, equivalentemente, la existencia de un Estado que puede forzar a cualquier propietario individual a instalar una estación de repostaje de combustibles alternativos; siendo el objetivo el de maximizar el beneficio de la única compañía propietaria o maximizar la cobertura global de la red.

Se pueden definir diferentes políticas de subsidios y el modelo desarrollado dará resultados para cada una de estas políticas de subsidios (con la restricción de que la aplicación de subsidios es para las primeras etapas y que posteriormente las infraestructuras han de ser rentables por si mismas), las cuales pueden posteriormente ser analizadas, seleccionando la de mayor interés para el organismo encargado de definir la política de subsidios óptima.

Descripción de la metodología

En este capítulo, se va a describir la metodología propuesta para la introducción progresiva del hidrógeno como combustible alternativo en el transporte privado. Se van a desarrollar teóricamente los diferentes submodelos que forman parte de la metodología y se va a definir el modelo de equilibrio de Stackelberg, así como el algoritmo heurístico con su función objetivo y sus restricciones.

3.1. Introducción

El uso de los vehículos alimentados por combustibles alternativos (Alternative Fuel Vehicles) para sustituir los vehículos propulsados por combustibles convencionales mediante motores térmicos de combustión interna, es una alternativa para el transporte por carretera, que proporcionará beneficios como seguridad de suministro, reducción de emisión de gases de efecto invernadero y mejora de la calidad del aire de las diferentes ciudades (ver citas Huang et al. (2009), Wang and Wang (2010), Stephens-Romero et al. (2010)).

Hoen and Koetse (2014) identifica cinco parámetros que han de ser tenidos en cuenta a la hora de garantizar la penetración en el mercado de los vehículos alimentados por combustibles alternativos, y por lo tanto, amigables medioambientalmente hablando, siendo dichos parámetros (a) el precio de compra del vehículo, (b) costes de operación o combustible, (c) autonomía del vehículo una vez repostado, (d) tiempo de repostaje y (e) disponibilidad de estaciones de repostaje o cobertura.

Los modelos de localización intentan acelerar la aceptación por parte de los mercados de los vehículos alimentados por combustibles alternativos, haciendo que se tomen decisiones lo mas eficientes posibles a la hora de desarrollar la infraestructura de repostaje. Uno de los principales problemas que se plantean a la hora de definir la red de infraestructuras de repostaje, necesarias para suministrar a los vehículos alimentados por combustibles alternativos, es el dilema conocido como el huevo y la gallina (Wang and Wang (2010)).

La existencia de infraestructura (suministro de combustible) genera una de-

manda (vehículos en el mercado), pero para que la infraestructura de repostaje sea económicamente viable, es necesario que exista un cierto nivel de demanda superior a un umbral mínimo. La Figura 3.1 muestra los elementos esenciales de este círculo vicioso existente entre la oferta y la demanda o entre los propietarios de las infraestructuras de repostaje y los fabricantes de vehículos y usuarios.

Para romper este círculo vicioso comentado anteriormente, es necesario colaboración público-privada para poder superar las barreras iniciales existentes a la hora de introducir los combustibles alternativos en el mercado. Una política de subsidio temporal por parte del sector público puede romper este círculo vicioso y por tanto suavizar las barreras existentes para la penetración de los combustibles alternativos en el mercado.

Esta política se puede enfocar a: i) diseñar una red de infraestructuras de repostaje inicial con una ubicación óptima de dichas infraestructuras, de forma que se reduzcan al mínimo los subsidios gubernamentales, con el objeto de maximizar la utilización de las infraestructuras construidas o ii) diseñar políticas que incentiven a las actuales infraestructuras de repostaje de combustible, a la inclusión entre sus productos actuales (diésel y gasolina fundamentalmente), de diferentes combustibles alternativos.

Estas ayudas deberán destinarse a las estaciones de repostaje más convenientes, por tanto se tiene que destinar una parte del subsidio a primar la cantidad de combustible alternativo dispensado por cada una de ellas, y la otra parte del subsidio a los costes de amortización, debiendo estas ayudas ir decreciendo a lo largo del tiempo, de forma que se puedan recoger los mecanismos dinámicos hasta que el mercado de los combustibles alternativos sea maduro.

Esta tesis doctoral refleja el punto de vista ii) y considera los cinco elementos que se reflejan en la Figura 3.1. Además establece una metodología, consistente en un modelo de equilibrio de Stackelberg, que permite diseñar unas políticas de subsidios óptimas de forma que se favorezca el crecimiento de las infraestructuras de combustibles alternativos. El Estado desempeña el papel de *líder* y los propietarios de las estaciones de repostaje son los *seguidores*. El líder desea diseñar la política de subsidios que minimice la inversión necesaria para el despliegue efectivo de la infraestructura. Por otro lado los propietarios de las infraestructuras de repostaje con potencial de albergar combustibles alternativos, deciden dinámicamente incluir o no (variables del nivel inferior) combustibles alternativos en su infraestructura, en función de las estimaciones del beneficio de su inversión, basada en las actuales políticas de subsidios y en la demanda de combustibles alternativos.

El modelo recoge el comportamiento de los diferentes actores del proceso (estado Español, propietarios de estaciones de repostaje de combustible y propietarios de los vehículos alimentados por combustibles alternativos) en un contexto dinámico y de competencia entre las estaciones de repostaje. El aspecto de competencia es novedoso en la literatura, ya que en la mayoría de los trabajos revisados en bibliografía, se asume una localización coordinada, es decir, un monopolio en la propiedad de las estaciones de repostaje de combustibles alternativos o, equivalentemente, la existencia de un Estado que puede forzar a cualquier propietario individual a instalar una estación de repostaje de com-

Figura 3.1: Representación simplificada de los elementos que forman parte del proceso de la oferta, la demanda y el mercado de los combustibles alternativos.

bustibles alternativos; siendo el objetivo el de maximizar el beneficio de la única compañía propietaria o maximizar la cobertura global de la red.

En el modelo desarrollado en la presente tesis doctoral, la evolución del número de estaciones de repostaje de combustibles alternativos, y su localización depende de la evolución de los subsidios que los propietarios de las estaciones de repostaje de combustibles alternativos reciben del Estado y de la evolución del número y distribución en el espacio de los vehículos de combustibles alternativos, y ésta a su vez depende del desarrollos de las infraestructuras de repostaje.

De entre los diferentes combustibles alternativos existentes, en la presente tesis doctoral, el desarrollo del modelo se va a centrar en el hidrógeno como combustible alternativo. Se considera el vehículo eléctrico de pila de combustible, por ser este vehículo el que se está introduciendo en el mercado, por parte de las principales marcas automovilísticas como Hyundai y Toyota.

Los elementos que se muestran en la descripción del problema planteado en la Figura 3.1 se utilizan para definir la taxonomía de los diferentes submodelos que son necesarios para el desarrollo del modelo que define la implantación de la infraestructura de repostaje de hidrógeno.

Los principales elementos considerados, se corresponden con los submodelos considerados a la hora de desarrollar el modelo de localización, con la optimización de las subvenciones por parte del estado, siendo estos elementos o submodelos los siguientes:

- El primer elemento del modelo es la **modelización del tráfico**, que trata de describir como viajan los diferentes usuarios, es decir, origen y destino de los viajes y la ruta que toman para su realización. La regla mas ampliamente utilizada por la mayor parte de los usuarios es la del camino mas corto o camino mínimo (Shortest Path, SP), aunque recientemente algunos modelos están utilizando los desvíos que el usuario estaría dispuesto a aceptar dentro de una determinada ruta (Deviation Path, DP).
- El segundo elemento del modelo es la **demanda de los vehículos de combustibles alternativos**, este modelo describe la decisión de un usuario a la hora de adquirir un vehículo, en función de un conjunto de atributos como por ejemplo el precio de compra, disponibilidad de combustible, tiempo de recarga, etc., y que predice la introducción de los vehículos de combustibles alternativos en el mercado a lo largo del tiempo. En este modelo se tienen en cuenta ciertas suposiciones o consideraciones relacionadas con la evolución tecnológica, como por ejemplo precio de la energía, etc., lo cual incide directamente en el valor de los atributos, los cuales varían a lo largo del tiempo.
- El tercer elemento del modelo es el **comportamiento de las estaciones de repostaje de combustibles alternativos**, que intenta predecir la forma en la que evolucionará el número de estaciones de repostaje de combustible, su tipología y su ubicación en el tiempo y en el espacio. Este modelo requiere modelizar el comportamiento de los propietarios de las infraestructuras de repostaje de combustible, en lo referente a la decisión de incorporar o no combustibles alternativos en su infraestructura de repostaje, basadas en criterios técnico-económicos. Adicionalmente, se ha de modelar la competencia existente entre las estaciones de repostaje que deciden incorporar combustibles alternativos, distinguiendo si existe un único propietario del conjunto de estaciones, posiblemente el Estado o una gran empresa del sector energético (monopolio) o si cada potencial estación de repostaje de combustible alternativo pertenecen a empresas independientes (mercado competitivo).
- El cuarto elemento o submodelo es la **determinación de la cobertura** que depende del numero de infraestructuras de repostaje de combustibles alternativos instaladas y de su localización espacial.
- El quinto elemento o submodelo es el relacionado con las **políticas de subsidios del estado**, en el que el estado define una política inicial de subsidios (subsidio a los costes de amortización de las infraestructuras, subsidio por kilogramo de hidrógeno vendido, subsidio a la adquisición de vehículos alimentados por combustibles alternativos, etc.) para promover el despliegue de infraestructuras de repostaje de combustibles alternativos, teniendo que ser dichas infraestructuras sostenibles en el tiempo y la intensidad de los subsidios decrecientes en el tiempo.

La tabla 2.1 reflejada en el estado del arte, resume algunos de los artículos publicados recientemente sobre el tema objeto de investigación, con especial atención a los elementos clave mencionados anteriormente.

La modelización de este problema requiere recoger dinámicamente los mecanismos de equilibrio entre la oferta y la demanda de transporte basada en combustibles alternativos. Debido a su complejidad, los trabajos orientan su análisis a uno de los dos aspectos. Bajo un punto de vista de la demanda, la herramienta mas empleada son los modelos de elección discreta, los cuales permiten variaciones sistemáticas de suposiciones acerca de las preferencias de los consumidores. Greene (1997) utilizó un análisis logit anidado en una encuesta de preferencias declaradas para investigar de cobertura de la red (a través del porcentaje de estaciones de servicio existentes que disponen de combustibles alternativos), expresándose como la disposición del consumidor a pagar por la disponibilidad de combustible alternativo. Welch (2007) utiliza un modelo de elección discreta para analizar la sensibilidad de los consumidores a la cobertura de la estación de combustible alternativo.

Melendez and Milbrandt (2006) cuantifican la demanda de vehículos de hidrógeno proyectada en Estados Unidos eliminando la distribución espacial del tráfico y asumiendo una variedad de tasas de penetración de los vehículos eléctricos de pila de combustible, para posteriormente evaluar el número de estaciones de repostaje de hidrógeno que se necesitaría para alimentar estos vehículos y donde se podrían ubicar de forma realista.

Leiby et al. (2005) desarrollaron un modelo de simulación de mercado, llamado Hytrans, que representa al mismo tiempo el comportamiento de los proveedores de combustible, fabricantes de vehículos y los consumidores. Greene (1997) utilizan Hytrans para evaluar tres escenarios de transición de penetración en el mercado de vehículos de pila de combustible de hidrógeno y para evaluar los costos de las políticas para lograr una transición hacia una economía del hidrógeno.

El enfoque más ampliamente analizado bajo punto de vista de la oferta es el mercado monopolístico (MM), bajo el cual se desea localizar un conjunto de infraestructuras de repostaje, de modo que se optimice un cierto índice de cubrimiento de la demanda. En la literatura se pueden encontrar modelos donde las infraestructuras de repostaje se localizan en nodos, arcos o caminos (Angulo et al. (14 a), Angulo et al. (14 b)) y el criterio de cubrimiento empleado es el flujo de origen - destino capturado /interceptado. Un trabajo de referencia es el modelo de localización de intercepción de flujos citado en las referencias Hodgson (1990) y Berman et al. (1992). Kuby and Lim (2005) extiende el modelo anterior para localizar un numero de estaciones de repostaje dado, siendo este modelo conocido como modelo de localización de infraestructuras de repostaje de flujo. Los trabajos de Kuby and Lim (2007), Upchurch et al. (2009), Kuby et al. (2009) y Lim and Kuby (2010) han desarrollado importantes investigaciones en la mejora de los métodos computacionales para la resolución del modelo de localización de infraestructuras de repostaje de flujo, el cual incluye la capacidad de las infraestructuras de respotaje y su aplicación a casos reales como por ejemplo al estado de Florida.

Kim and Kuby (2012), Kim and Kuby (2013) y ? mejoran la modelización del comportamiento de los conductores en lo referente a la carga de combustible cuando las estaciones de repostaje de combustible están escasamente distribuidas, asumiendo la necesidad de que el conductor se tenga que desviar, lo cual puede hacer que salga de su origen con el vehículo repostado. En este caso, recibe el nombre de modelo de recarga considerando el desvío del flujo. Se considera que la demanda de flujo capturado por las estaciones de repostaje disminuye a medida que aumenta la desviación que los conductores han de hacer para repostar.

Brey et al. (2012) utilizan un proceso analítico jerárquico para clasificar, en base a criterios de suministro, demanda y ambientales, los más de 770 municipios de Andalucía en función de su idoneidad para el establecimiento de hidrogeneras. Posteriormente, se incorpora este resultado en un problema de optimización para conseguir la planificación óptima del número y localización de infraestructuras de repostaje de hidrógeno o hidrogeneras que den cobertura a Andalucía. Brey et al. (2014) utilizan un enfoque espacial para estudiar una estrategia de despliegue secuencial de estaciones de repostaje de hidrógeno o hidrogeneras desde el momento actual hasta el año 2030 para Andalucía. En cada etapa, se identifican los principales nodos y clústeres para examinar en qué áreas de esta región debe empezar la puesta en marcha de estaciones de servicio. Por último, se estima el número y tamaño de las estaciones de repostaje de hidrógeno o hidrogeneras para cada etapa, así como la inversión requerida para el despliegue de esta infraestructura sobre la base de los costos estimados para cada tipo de estación de repostaje de hidrógeno o hidrogenera durante el periodo de tiempo antes mencionado. Brey et al. (2014) aplican una metodología basada en el análisis envolvente de datos para seleccionar los municipios correspondientes para el establecimiento de estaciones de abastecimiento de combustible de hidrógeno en las primeras etapas de la implementación del proceso en España.

3.2. Modelización del tráfico

Se asume que la región de estudio se modeliza mediante un grafo $\mathcal{G} = (V, A)$ donde el conjunto de vértices o nodos V representan las ciudades y la unión entre las diferentes nodos o ciudades, es lo que se conoce como arcos A , estando dichos arcos formados por las principales carreteras que forman parte del camino mínimo entre las ciudades. Adicionalmente se supone que esta red de tráfico o grafo, permite el desplazamiento de vehículos entre las ciudades, sin considerar, por simplicidad del modelo, los movimientos de los vehículos dentro de las ciudades.

El principal objetivo de este submodelo es obtener el patrón de movimiento, es decir, dado un par origen-destino $\omega = (j, j') \in V \times V$, se pueden obtener el número de viajes que se realizan dentro del par ω y la ruta que se utiliza para recorrer el par origen-destino. Este problema tiene la componente del tiempo, la cual ha de ser considerada. Se supone que el horizonte temporal para la introducción de la infraestructura de repostaje de combustibles alternativos se divide en periodos de tiempo. Cada uno de estos periodos de tiempo se le denota como t .

Para estimar la matriz de viajes origen-destino, se supone que no hay congestión en la red, que los usuarios siempre toman el camino mínimo, y por lo tanto se supone que la distancia d_ω de la ruta utilizada para cada par origen-destino ω es conocida. Otros métodos como por ejemplo los citados por Abrahamsson (1998) y García-Ródenas and Verastegui-Rayó (2008) se pueden utilizar, si se consideran los efectos de la congestión de tráfico.

Los modelos entrópicos son ampliamente utilizados debido principalmente a su simplicidad. En la presente tesis doctoral, se utiliza el modelo entrópico para obtener el patrón de movimiento en cada período de tiempo t .

$$\begin{aligned} &\text{Maximizar}_{\gamma^t, q^t} & E^t &= - \sum_{\omega} q_{\omega}^t \ln(q_{\omega}^t) \\ &\text{sujeto a :} & \sum_j q_{(j,j')}^t &= \gamma^t P_j^t, & j' = 1, \dots, J \\ & & \sum_{j'} 2d_{(j,j')} q_{(j,j')}^t &= \mu_j^t \xi_j^t, & j = 1, \dots, J \\ & & \gamma^t, q_{\omega}^t &\geq 0 \end{aligned} \quad (3.1)$$

donde ξ_j^t es el número de kilómetros recorridos por un vehículo de la ciudad j en el periodo de tiempo t y μ_j^t es la proporción de los kilómetros que se recorren entre ciudades (el modelo asume que los viajes son de ida y vuelta, por ese motivo se multiplica por 2 en la segunda restricción). El parámetro P_j^t es la estimación de la población de la ciudad j en el periodo de tiempo t y la variable γ^t estima la proporción de viajes realizados en la red de carreteras por cada habitante.

La primera restricción establece que el número de viajes que se realizan a cada ciudad j' es proporcional a la población de la misma. La segunda restricción garantiza que un vehículo de la ciudad j viaja el número de kilómetros medios anuales $\mu_j^t \xi_j^t$ establecidos para esa ciudad en el periodo de tiempo t .

A modo de resumen, después de la resolución del modelo de entropía en cada período de tiempo t , se considera que cada vehículo matriculado en la ciudad j realiza $q_{(j,j')}^t$ viajes en el periodo de tiempo t y para cada ciudad j' , y que la ruta utilizada es la del camino mínimo r_ω para cada par origen-destino $\omega = (j, j')$.

Para determinar el camino mínimo, se utiliza el algoritmo de Dijkstra, también llamado algoritmo de caminos mínimos. Es un algoritmo para la determinación del camino más corto dado un nodo origen al resto de nodos en un grafo con pesos en cada arco, que en este caso es la distancia. La idea subyacente en este algoritmo consiste en ir explorando todos los caminos más cortos que parten del nodo origen y que llevan a todos los demás nodos; cuando se obtiene el camino más corto desde el nodo origen, al resto de nodos que componen el grafo, el algoritmo se detiene. El algoritmo es una especialización de la búsqueda de costo uniforme, y como tal, no funciona en grafos con nodos de coste negativo (al elegir siempre el nodo con distancia menor, pueden quedar excluidos de la búsqueda nodos que en próximas iteraciones bajarían el costo general del camino al pasar por un nodo con costo negativo), cosa que no es de importancia en la presente tesis doctoral, pues todos los arcos tienen una distancia positiva.

3.3. Modelización del comportamiento de los usuarios de vehículos

Para modelizar el comportamiento de un usuario a la hora comprar un vehículo, en lo que a toma de decisión tecnológica del tipo de combustible se refiere, se va a modelizar utilizando el modelo Logit Anidado. El modelo logit anidado, ha sido ampliamente utilizado en el campo del transporte como citan Ben-Akiva and Lerman (1987), Oppenheim (1995) y García and Marín (2005).

El modelo logit anidado, en la presente tesis doctoral, muestra el proceso de elección de un vehículo eléctrico de pila de combustible alimentado por hidrógeno, también conocido como FCEV (ver Figura 3.2). En un primer nivel, el usuario debe seleccionar entre un vehículo alimentado por combustible convencional (alternativa *b*) o un vehículo alimentado por combustibles alternativos (alternativa *a*). En el segundo nivel, es decir, una vez que ha decidido adquirir un vehículo alimentado por combustibles alternativos, ha de seleccionar que tipo de combustible alternativo que va a alimentar al vehículo.

Figura 3.2: Modelo logit anidado para la toma de decisión en la compra de vehículos.

El valor $\bar{g}_j^t$ es la previsión de venta de vehículos durante el periodo de tiempo t en la ciudad j . El modelo desagrega la venta total de vehículos por los diferentes tipos de combustibles alternativos. En la primera toma de decisión, el usuario de la ciudad j en el periodo de tiempo t tiene dos alternativas a la hora de comprar un vehículo nuevo que son (a) vehículos alimentados por combustibles alternativos o (b) vehículos alimentados por combustible convencional.

El primer nivel del modelo divide las ventas de vehículos entre las alternativas (a) y (b) de la siguiente forma:

$$g_j^{a,t} = \frac{\exp(\beta_1 U_j^{m,t})}{\sum_{m \in \{a,b\}} \exp(\beta_1 U_j^{m,t})} \cdot \bar{g}_j^t \quad m \in \{a,b\}, \quad (3.2)$$

donde $U_j^{m,t}$ es la utilidad de la alternativa m para el usuario de la ciudad j en el periodo de tiempo t .

El segundo nivel del modelo logit anidado desagrega los vehículos alimentados por combustibles alternativos entre los diferentes tipos de combustibles alternativos considerados en el estudio $\mathcal{S}$ mediante la siguiente expresión:

$$g_{j,s}^{a,t} = \frac{\exp(\beta_2 U_{j,s}^{a,t})}{\sum_{s' \in \mathcal{S}} \exp(\beta_2 U_{j,s'}^{a,t})} \cdot g_j^{a,t} \quad s \in \mathcal{S} \quad (3.3)$$

El modelo logit anidado calcula la utilidad de cada alternativa de vehículo $U_j^{a,t}$ como el logaritmo de la sumatoria de las utilidades de los tipos de vehículos alimentados por combustibles alternativos:

$$U_j^{a,t} = \frac{1}{\beta_2} \ln \left(\sum_{s \in \mathcal{S}} \exp(\beta_2 U_{j,s}^{a,t}) \right) \quad (3.4)$$

Hoën and Koetse (2014) dan una visión general de los diversos atributos utilizados en las diferentes investigaciones realizadas, a la hora de seleccionar las preferencias de los usuarios a la hora de adquirir un vehículo alimentado por combustibles alternativos. Estos autores señalan como principales atributos el precio de compra, costes de operación, autonomía, el tiempo de recarga y la disponibilidad de combustible, como los principales atributos que el usuario analiza a la hora de seleccionar la tipología de vehículo que va a comprar. En la presente tesis doctoral, las emisiones de gases de efecto invernadero en general y las emisiones de CO_2 son importantes, con lo que se va a considerar para la determinación de la utilidad lineal de cada alternativa.

$$U_{j,s}^{a,t} = \alpha_1 pv_s^t + \alpha_2 pc_s^t + \alpha_3 co_{j,s}^t + \alpha_4 dr_s^t + \alpha_5 rt_s^t + \alpha_6 e_s^t \quad (3.5)$$

donde:

- pv_s^t es el precio de venta del vehículo tipo s en el periodo de tiempo t , en k€,
- pc_s^t es el precio del combustible en el periodo de tiempo t para cada tipo de vehículo s , en c€/equivalente 1 litro diésel.
- $co_{j,s}^t$ es el grado de cobertura para la ciudad j para un vehículo tipo s en el periodo de tiempo t , en km. El atributo co_{j,H_2}^t modela la disponibilidad de

combustible para el usuario, también llamado cobertura (existen dos tipos de cobertura que son (a) cobertura interciudad, entendida como la máxima distancia existente entre dos estaciones de repostaje que disponen del combustible alternativo deseado en un par origen-destino y (b) cobertura intraciudad que es la distancia máxima existente entre dos estaciones de repostaje que disponen del combustible deseado, dentro de la ciudad), siendo este atributo obtenido de otro submodelo que se comentará en próximos apartados.

- dr_s^t es la autonomía, o el número de km que un usuario puede recorrer utilizando el 100 % del combustible disponible, en el periodo de tiempo t para un vehículo tipo s , en km.
- rt_s^t es el tiempo que tarda un vehículo tipo s en recargar por completo su almacenamiento de combustible, desde el 0 hasta el 100 % de su capacidad s en el periodo de tiempo t , en min.
- e_s^t son las emisiones de CO_2 generadas por un vehículo tipo s en el periodo de tiempo t , en gCO_2/km .

Finalmente, el número total de vehículos eléctricos de pila de combustible alimentados por hidrógeno ¹ existentes en la ciudad j en el periodo de tiempo t viene determinado por la siguiente expresión:

$$G_j^t = \sum_{t'=0}^t g_{j,H_2}^{a,t'} \quad (3.6)$$

Todos los atributos considerados para determinar la utilidad de cada tipo de vehículo, son dinámicos, es decir, evolucionan a lo largo del tiempo. Además, todos ellos, a excepción de la cobertura de la infraestructura, son exógenos en el modelo propuesto y es necesario introducir supuestos basados en bibliografía y previsiones que dependen en gran medida de los progresos tecnológico y evolución de precios de energía, entre otros factores, en los años futuros. En este análisis, como es lógico, no se pueden incluir todas las incertidumbres existentes a la hora de realizar previsiones, por lo que se basa en datos bibliográficos de estudios prospectivos y la experiencia de los investigadores del Centro Nacional del Hidrógeno.

El objetivo final del modelo de localización, es el diseño dinámico de los primeros subsidios para asegurar despliegue de infraestructura de repostaje que sea adecuado, óptimo y sostenible a lo largo del tiempo. Estos subsidios se deben de aportar de acuerdo con la evolución de factores tecnológicos y la evolución de las economías de escala en la producción de vehículos alimentados por combustibles alternativos.

¹Se asume que el período de obsolescencia del vehículo es de 12 años, según información técnica de los diferentes fabricantes.

3.4. Modelización de la cobertura

El atributo *cobertura* indica la disponibilidad de repostar combustible, es decir, esta directamente relacionado con las infraestructuras de repostaje de combustible existentes. En la literatura el enfoque de capturar el flujo de los diferentes pares origen-destino que forman parte del grafo planteado, es un método que ha sido ampliamente utilizado. En este modelo, ya que el objetivo es medir la cobertura de la infraestructura de repostaje de combustibles alternativos en general y de hidrógeno en particular, de un determinado usuario de una ciudad j , se ha definido la cobertura como el número máximo de kilómetros que el usuario de la ciudad j ha de desplazarse para poder repostar, o dicho en otras palabras, la distancia máxima existente entre dos infraestructuras de repostaje de combustible que disponga de hidrógeno como combustible alternativo. Esta medición de cobertura se pondera por el tipo de viaje y el número de viajes realizados.

El nivel de cobertura de que dispone una infraestructura de repostaje de hidrógeno, depende directamente del número de estaciones de repostaje de hidrógeno existentes. Se considera, principalmente por razones económicas y de operación, que las estaciones de repostaje de hidrógeno, se van a ubicar en las estaciones de repostaje de combustibles existentes en la actualidad, pues es factible (siempre que disponga de un espacio mínimo) poder ampliar su porfolio de productos e incluir el hidrógeno entre los combustibles que la infraestructura de repostaje ofrece a sus clientes. Estas posibles estaciones de repostaje que pueden albergar el hidrógeno como combustible alternativo, se tratan de forma desagregada, aportando datos exactos y concretos cuando se encuentra en un arco del grafo, es decir, entre dos ciudades, y se tratan de forma agregada cuando la estación de repostaje susceptible de incluir el hidrógeno entre sus combustibles, esta ubicada en los nodos o ciudades.

Para la modelización de la cobertura, se introducen las siguientes variables:

$$x_i^t = \begin{cases} 1 & \text{si la hidrogenera } i \text{ esta operativa en el periodo } t \\ 0 & \text{si no esta operativa} \end{cases} \quad (3.7)$$

$$x_j^t \equiv \text{número estaciones repostaje existentes en la ciudad } j \text{ en el periodo } t \quad (3.8)$$

Donde adicionalmente se incluyen la siguiente restricción

$$0 \leq x_j^t \leq N_j \quad (3.9)$$

donde N_j es el número de estaciones de repostaje de combustible que son susceptibles de albergar el hidrógeno entre sus combustibles alternativos en la ciudad j .

Se define *cobertura en el par origen-destino* $\omega = (j, j')$ como la máxima distancia entre dos estaciones de repostaje de hidrógeno consecutivas en la ruta correspondiente al camino mínimo que satisface el par origen-destino ω .

Se define ω como un par origen-destino, r_ω es la ruta utilizada por los usuarios del par ω y $i_1, i_2, \dots, i_n$ son las estaciones de repostaje de hidrógeno abiertas en el

periodo de tiempo t en el orden en el que van apareciendo en la ruta que satisface el par, pudiéndose por tanto definir la ruta del par origen-destino mediante la siguiente expresión:

$$co_{\omega}^t = \max_{s=1, \dots, n-1} \{d(i_s, i_{s+1})\} \quad (3.10)$$

donde $d(x, y)$ es la distancia entre las estaciones x e y .

A partir del concepto de cobertura del par, se define la cobertura en la ciudad j en el periodo de tiempo t como una media ponderada de los viajes urbanos e interurbanos, utilizando para ello la siguiente expresión:

$$co_{j, H_2}^t = \mu_j^t \frac{\sum_{\omega=(j, j') \in W} co_{\omega}^t d_{\omega} q_{\omega}^t}{\sum_{\omega=(j, j') \in W} d_{\omega} q_{\omega}^t} + (1 - \mu_j^t) \eta_j(x_j^t) \quad (3.11)$$

donde d_{ω} es la distancia del par r_{ω} . La variable $\eta_j(x_j^t)$ representa el grado de cobertura en los viajes realizados dentro de la ciudad j como una función del número de estaciones de repostaje que incluyen hidrógeno x_j^t como combustible alternativo. Esta función tiene un cálculo complejo, por lo que se va a utilizar la simulación de Monte Carlo para realizar dicha aproximación, que finalmente es una aproximación mediante la utilización de consideraciones geométricas.

Hay que tener en cuenta que $co_{j, s}^t$ es determinada por el modelo para las infraestructuras de repostaje de hidrógeno ($s = H_2$). Para el resto de combustibles alternativos tenidos en cuenta en la presente tesis doctoral (gas natural comprimido $s = CNG$ y electricidad $s = Electricidad$) la cobertura es un elemento exógeno y se introduce directamente en el modelo, a partir de datos bibliográficos de prospectivas tecnológicas.

3.5. Modelización del comportamiento de los propietarios de las estaciones de repostaje (variable x)

El principal objetivo de este submodelo es definir la evolución dinámica de las variables de localización x_i^t, x_j^t . Se asumen las siguientes hipótesis:

- H₁: Todas las hidrogeneras están equipadas con la misma tecnología, generación on-site mediante electrólisis. Esta hipótesis puede ser eliminada y considerar otras tipologías de estaciones de hidrogenera. Se considera esta hipótesis como una forma de simplificar el modelo inicial.
- H₂: Se asume que las hidrogeneras se van a ubicar en las infraestructuras de repostaje existentes, de forma que los costes de terreno, operación y mantenimiento puedan ser compartidos con la infraestructura original.
- H₃: Se considera que existe un mercado competitivo entre los dueños de las infraestructuras de repostaje de combustible que pretenden incluir el hidrógeno en su porfolio de productos.

3.5.1. Estimación del número de FCEV que repostan en cada hidrogenera

Se asume que las hidrogeneras existentes en los arcos o caminos mínimos definidos para viajar entre los diferentes nodos o ciudades, van a suministrar hidrógeno a los usuarios que realizan viajes interurbanos y que las hidrogeneras ubicadas en las ciudades van a suministrar hidrógeno a los vehículos que realizan viajes urbanos. Por otro lado, se asume que todas las hidrogeneras son igualmente atractivas (idénticos precios y servicios) y por lo tanto, la probabilidad de repostar en cada una de las hidrogeneras i para cada vehículo que realiza el viaje dentro de un determinado par origen-destino ω en el periodo de tiempo t , $p_{i,\omega}^t$, será inversamente proporcional al número de hidrogeneras existentes en las carreteras que forman parte el camino mínimo en el par origen-destino ω .

$$p_{i,\omega}^t = \frac{1}{n_{\omega}^t} \quad (3.12)$$

donde n_{ω}^t es el número de hidrogeneras disponibles en el periodo de tiempo t en la ruta o camino mínimo que satisface el par origen-destino ω . Esto se puede expresar de la siguiente forma:

$$n_{\omega}^t = \sum_{a \in r_{\omega}} \sum_i \delta_{i,a} x_i^t \quad (3.13)$$

$a \in r_{\omega}$ representa todas las carreteras que forman parte del camino mínimo del par origen-destino r_{ω} , $\delta_{i,a}$ que valdrá 1 si la hidrogenera i esta ubicada en el camino mínimo que forma parte del par origen-destino a .

La cantidad de hidrógeno (H_2) suministrada por la hidrogenera i ($x_i^t = 1$), en el periodo de tiempo t , es función de la localización exacta ($i \in a$ en el arco, $i \in j$ en la ciudad), siendo:

$$c_i^t = \begin{cases} \sum_{w=(j,j') \in W} k d_w p_{i,w}^t G_j^t q_{j,j'}^t & i \in a \\ \frac{k(1-\mu_j^t)}{n_j^t} \xi_j^t & i \in j \end{cases} \quad (3.14)$$

donde el factor k convierte los kilómetros recorridos en kilogramos de hidrógeno (H_2) utilizados o consumidos y n_j^t es el número de hidrogeneras operativas en la ciudad j en el periodo de tiempo t .

3.5.2. Estimación del beneficio de la infraestructura de repostaje de hidrógeno

Se asume que los costes de operación y mantenimiento de las hidrogeneras son fijos y determinados, y que son los mismos para todas las hidrogeneras en el mismo periodo de tiempo t . Para poder considerar las hipótesis tecnológicas con las que se estiman los precios (a la baja) de las nuevas hidrogeneras, se utiliza el factor $\kappa_{t'}^t$ que se corresponde con los costes de operación y de amortización de la infraestructura de recarga en el periodo de tiempo t para una hidrogenera que abrió en el periodo de tiempo anterior t' .

El beneficio obtenido por la hidrogenera i en el periodo de tiempo t , viene determinado por la siguiente expresión:

$$b_i^t = s_i^t + \gamma^t c_i^t - \kappa_{t'(i)}^t \quad (3.15)$$

donde s_i^t es el subsidio que la hidrogenera i , recibe en el periodo de tiempo t y $t'(i)$ es el periodo de tiempo donde la estación de repostaje decide incorporar el hidrógeno como combustible alternativo i . El parámetro γ^t mide el margen de beneficio que la hidrogenera obtiene por la venta del kilogramo de hidrógeno en el periodo de tiempo t .

3.5.3. Modelización del comportamiento de las infraestructuras de repostaje de hidrógeno (variable x)

Se asume que si el beneficio acumulado en los periodos anteriores en los que la estación de repostaje que incluye hidrógeno como combustible alternativo ha estado operativa, es menor que un umbral mínimo determinado, la estación de repostaje que incluye hidrógeno o hidrogenera decide no continuar con dicho elemento como combustible alternativo. Matemáticamente, esta relación es modelada de la siguiente forma:

$$\text{Si } \sum_{t'=1}^t b_i^{t'} \leq -\nu^t \Rightarrow x_i^{t+1} = 0 \quad (3.16)$$

En la presente tesis doctoral, se considera que existe un mercado competitivo entre las diferentes infraestructuras de repostaje, en el que los propietarios de dichas infraestructuras, no conocen con exactitud los beneficios que obtienen las infraestructuras de repostaje que incorporan hidrógeno como combustible alternativo que están alrededor de la suya. Se define de esta forma, la zona de afección o área de influencia de una estación de repostaje i en el nodo o ciudad j o en camino mínimo que interconecta dos nodos, también llamado arcos a , en el cual esta localizada la infraestructura de repostaje que incluye hidrógeno y se denota como $i \in a/j$. El propietario de la estación de repostaje que incluye hidrógeno i estima la utilidad de la apertura de la infraestructura de repostaje de hidrógeno mediante la siguiente expresión:

$$U_i^t = \theta + \bar{b}_{a/j}^t + \varepsilon_i; \text{ con } i \in j/a \quad (3.17)$$

donde $\bar{b}_{a/j}^t$ es la ganancia media de infraestructuras de repostaje que incluyen hidrógeno, que operan² durante el periodo de tiempo t en el área a/j y θ es un parámetro que identifica la resistencia que suelen tener los empresarios a la hora de comenzar con una nueva actividad empresarial. Los modelos aleatorios de maximización de la utilidad, permiten modelar la forma en la que el propietario de una infraestructura de repostaje, decide si invertir o no, en dotar a su infraestructura de repostaje del hidrógeno como combustible alternativo. Bajo

²Si no existiera la infraestructura de repostaje de hidrógeno, se podría estimar el beneficio como la diferencia entre el subsidio y los costes de amortización en un periodo de tiempo determinado t

esta premisa de que los términos de error ε_i son idénticos y están distribuidos independientemente mediante una distribución de Gumbel, la probabilidad de elegir incluir hidrógeno como combustible alternativo en una infraestructura de repostaje, viene dada por la siguiente expresión:

$$\mathbb{P}(x_i^{t+1} = 1/\bar{b}_{a/j}^t) = \frac{\exp \left[\lambda(\theta + \bar{b}_{a/j}^t) \right]}{\exp \left[\lambda(\theta + \bar{b}_{a/j}^t) \right] + 1} \quad (3.18)$$

El hecho de que nuevas infraestructuras de repostaje incluyan el hidrógeno como combustible alternativo en el próximo periodo, significa que los beneficios que se van a obtener no son exactamente los estimados o esperados. Se asume que existe una cierta coordinación entre las potenciales infraestructuras de repostaje, que pueden incluir el hidrógeno como combustible, que ven la oportunidad que podrían perder al no incorporar hidrógeno y deciden finalmente incluir el hidrógeno en la infraestructura de repostaje. Se calcula el número $m_{a/j}^{t+1}$ de las nuevas infraestructuras de repostaje que deciden incorporar el hidrógeno como combustible alternativo, en el periodo de tiempo $t + 1$ en el área a/j , mediante la expresión:

$$m_{a/j}^{t+1} = \text{Arg maximize} \left\{ m \in \{0, 1, 2, \dots, N_{a/j} - n_{a/j}^t\} : \frac{m + n_{a/j}^t}{N_{a/j}} \leq \mathbb{P} \left(x_i^{t+1} = 1 / \bar{b}_{a/j}^{t+1}(m) \right) \right\} \quad (3.19)$$

donde $\bar{b}_{a/j}^{t+1}(m)$ es una estimación de los beneficios que se pueden obtener si se decide incorporar hidrógeno como combustible alternativo m en el siguiente periodo. Para poder realizar una aproximación de este valor, se utiliza la expresión:

$$\bar{b}_{a/j}^{t+1}(m) = \begin{cases} \bar{b}_{a/j}^t - \gamma^t \frac{m}{(n_{a/j}^t + m)n_{a/j}^t} \sum_{i \in a/j} c_i^t & \text{if } n_{a/j}^t > 0 \\ \bar{b}_{a/j}^t & \text{if } n_{a/j}^t = 0 \end{cases} \quad (3.20)$$

Una vez que se calcula el valor de $m_{a/j}^{t+1}$, las infraestructuras de repostaje con potencial para incorporar hidrógeno como combustible alternativo (de entre las que están cerradas en el periodo de tiempo t), se seleccionan al azar en el área a/j , que se abrirán en el arco a o en el caso de la ciudad j , siendo una cuestión de abrir el número de infraestructuras de repostaje que incluyen hidrógeno, determinado por el modelo.

3.5.4. Modelización de los incentivos o subsidios

Se considera que los incentivos o subsidios que el Gobierno Español ofrecen a los inversores que decidan abrir una estación de repostaje de hidrógeno se aportan de la siguiente forma:

$$s_i^t = \psi^t + \phi^t c_i^t \quad (3.21)$$

donde el valor ψ^t representa el subsidio aportado para amortizar la inversión de la infraestructura de repostaje que decide incluir hidrógeno como combustible alternativo, mientras que ϕ^t incentivan a las infraestructuras de repostaje de combustible mas eficientes, que son aquellas, que debido a su localización, venden mas cantidad de hidrógeno (H_2).

3.6. Modelo de de localización

En este apartado, se formula el modelo de optimización con el objetivo de calcular la política de subsidio óptima, que el Gobierno Español ha de aplicar (ψ, ϕ) , para obtener un determinado grado de cobertura previamente definido para cada periodo de tiempo t^* , con el menor uso de recursos económicos posible. Adicionalmente, no solo se debe de alcanzar un grado de cobertura t^* , sino que debe ser sostenible a lo largo del tiempo, y por ello es un indispensable que varios periodos de tiempo t después, (denotado como e) las infraestructuras de repostaje que incluyen hidrógeno como combustible alternativo, han de seguir operativas y por lo tanto, deben ofrecer el mismo nivel de cobertura. El concepto de cobertura no esta completamente definido en la legislación de Unión Europea. Este modelo considera un subconjunto de pares de origen-destino estratégicos W^* y dentro de ellos se ha de garantizar que la máxima distancia entre dos estaciones de repostaje de hidrógeno ha de ser inferior a un determinado umbral B_0 definido por el Gobierno Español.

El modelo resultante, es un modelo de equilibrio de Stackelberg, en el que el líder (Gobierno Español) define una política de subsidio (ψ, ϕ) , y los seguidores (las infraestructuras de repostaje que potencialmente pueden albergar hidrógeno como combustible alternativo) compiten entre ellos, debiendo cada uno de ellos tomar la decisión de incorporar o no el hidrógeno como combustible alternativo x , de forma que maximice el beneficio esperado. Estos mecanismos se han descrito anteriormente y representado en el modelo mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Minimize}_{(\psi, \phi)} \quad \sum_{t,i} s_i^t(x) \quad (3.22)$$

$$\text{subject to :} \quad c o_{\omega}^{t^*}(x) \leq B_0 \text{ for all } \omega \in W^* \quad (3.23)$$

$$c o_{\omega}^{t^*+e}(x) \leq B_0 \text{ for all } \omega \in W^* \quad (3.24)$$

$$x = \text{Arg maximize}_{(x_i, x_j)} b(x_i, x_j, \psi, \phi) \quad (3.25)$$

$$\psi, \phi \geq 0 \quad (3.26)$$

De la misma forma, en la Figura 3.3 se puede observar de forma esquemática el modelo desarrollado según el equilibrio de Stackelberg.

3.7. Resolución del algoritmo

Antes de resolver el problema, se van a realizar varias transformaciones. La ecuación (3.19) representa una solución explícita del nivel inferior (3.25), lo que se puede indicar $x(\psi, \phi)$. Las restricciones sobre la cobertura (3.28) y (3.24) se pueden penalizar en la función objetivo, obteniendo un problema equivalente. Finalmente el problema se puede expresar:

$$\begin{aligned} \text{Minimize}_{(\psi, \phi)} L(\psi, \phi) = & \sum_{t,i} s_i^t(x(\psi, \phi)) \\ & + M \sum_{\omega \in W^*} \left(\max\{B_0 - c o_{\omega}^{t^*}(x(\psi, \phi)), 0\} + \max\{B_0 - c o_{\omega}^{t^*+e}(x(\psi, \phi)), 0\} \right) \end{aligned} \quad (3.27)$$

Figura 3.3: Modelo de localización. Equilibrio de Stackelberg.

$$\text{sueto a : } \psi, \phi \geq 0 \quad (3.28)$$

En la Figura 3.4 se pueden observar como se integran los diferentes submodelos y como para unos subsidios iniciales que son introducidos directamente, el algoritmo genético (GA) encuentra una solución que no es la optima pero es lo suficientemente buena para ofrecer unos resultados de interés.

Los algoritmos genéticos (GA) son métodos adaptativos que pueden usarse para resolver problemas de búsqueda y optimización. Están basados en el proceso genético de los organismos vivos. Generan una secuencia de posibles soluciones mediante el uso de un conjunto de operadores de transición estocásticos para transformar cada conjunto de soluciones en una solución factible, las cuales se ordenan de forma decreciente. El algoritmo genético por tanto, se basa en la convergencia estocástica del posible óptimo sobre múltiples iteraciones.

Los algoritmos genéticos son muy populares y ampliamente utilizados por los investigadores debido a su versatilidad en el manejo de una amplia gama de diferentes funciones no convexas. Otra característica que los hace adecuado para el problema planteado en la presente tesis doctoral es que no necesita el uso de funciones diferenciables. Además estos algoritmos se han aplicado exitosamente a problemas bi-nivel como el aquí planteado. Por contra requiere un alto coste computacional que deberá ser abordado en futuros trabajos.

Figura 3.4: Esquema resolución metodología.

4

Validación de la metodología propuesta. Casos de estudio

En este capítulo, se va a proceder a validar la metodología propuesta en el capítulo anterior, realizando para ello diferentes casos de estudio, obteniendo diferentes resultados, los cuales definirán si la metodología propuesta aporta resultados coherentes y por tanto, si la metodología propuesta es válida.

4.1. Introducción

Para validar la metodología planteada en el capítulo anterior, se va a plantear un caso de estudio para España. En concreto, se va a utilizar una red formada por las 5 ciudades españolas de mayor número de habitantes (Madrid, Barcelona, Zaragoza, Valencia y Sevilla) que serán los nodos del grafo, y las principales carreteras o arcos que unen las ciudades anteriormente comentadas, las cuales estarán formadas por las rutas que hacen mínimo el camino entre los diferentes nodos o ciudades (ver figura 1.7).

Con la red comentada anteriormente, se va a aplicar la metodología desarrollada, con el objetivo de poder validar dicha metodología, obteniendo resultados, que serán analizados en posteriores capítulos. Adicionalmente, a partir de los resultados del caso de estudio, se va a realizar una extrapolación para la totalidad de España.

Como variante de interés, se va a incluir subsidio a la venta de vehículos eléctricos de pila de combustible alimentados por hidrógeno, también conocidos como FCEV (reduciendo el atributo coste de adquisición), y se van a estudiar para el caso de estudio (5 nodos y 6 arcos) y se proyectará de la misma forma para la totalidad de España.

De la misma forma, se aportarán datos concretos como la evolución del parque automovilístico alimentado por hidrógeno, la evolución del mercado de hidrógeno (H_2) asociado a la movilidad, el número y ubicación exacta de las infraestructuras de repostaje de combustible, los subsidios que el gobierno Español ha de

aportar para el despliegue de la infraestructura, las emisiones de CO_2 ahorradas y el beneficio social que la introducción del hidrógeno como combustible para movilidad lleva asociado, todo ello para cada periodo de tiempo t .

El periodo de estudio es el comprendido entre 2016 y 2045, pues se considera que se van a desplegar infraestructuras de repostaje de hidrógeno o hidrogeneras entre los años 2016 y 2030, y que el gobierno Español apoyará a dichas infraestructuras de repostaje durante 15 años.

4.2. Modelización del tráfico

La región de estudio se modeliza mediante el grafo $\mathcal{G} = (V, A)$, que es el representado en la figura 1.7 donde el conjunto de vértices o nodos V representan las ciudades (N1:Barcelona, N2:Zaragoza, N3: Madrid, N4: Valencia y N5: Sevilla) y la unión entre las diferentes nodos o ciudades es lo que se conoce como arcos A (A1:Barcelona-Zaragoza, A2:Madrid-Zaragoza, A3:Madrid-Valencia, A4:Valencia-Barcelona, A5:Valencia-Sevilla y A6:Sevilla-Madrid), estando dichos arcos formados por las principales carreteras que forman parte del camino mínimo entre las ciudades (se supone que esta red de tráfico o grafo permite el desplazamiento de vehículos entre las ciudades, sin considerar, por simplicidad del modelo, los movimientos de los vehículos dentro de las ciudades).

Los arcos anteriormente comentados, están formados por las siguientes carreteras españolas:

- A1:Barcelona-Zaragoza. AP-2. 313 km. 2h 51 min.
- A2:Madrid-Zaragoza. A-2. 317 km. 2h 57 min.
- A3:Madrid-Valencia. A-3. 358 km. 3h 11 min.
- A4:Valencia-Barcelona. AP7. 350 km. 3h 16 min.
- A5:Valencia-Sevilla. A3 y A-4. 654 km. 6h 17 min.
- A6:Sevilla-Madrid. A-4. 528 km. 4h 44 min.

El principal objetivo de este submodelo es obtener el patrón de movimiento, es decir, dado un par origen-destino $\omega = (j, j') \in V \times V$, se pueden obtener el número de viajes que se realizan dentro del par ω y la ruta que se utiliza para recorrer el par origen-destino.

Para estimar la matriz de viajes origen-destino, se supone que no hay congestión en la red y que los usuarios siempre toman el camino mínimo, y por lo tanto se supone que la distancia d_ω de la ruta utilizada para cada par origen-destino ω es conocida.

Con los nodos y arcos comentados anteriormente, se pueden definir los siguientes pares origen-destino, teniendo en consideración que para la determinación de los caminos mínimos se utiliza el algoritmo de Dijkstra (consiste en

ir explorando todos los caminos más cortos que parten del vértice origen y que llevan a todos los demás vértices, deteniéndose el algoritmo cuando se obtiene el camino más corto desde el vértice origen, al resto de vértices que componen el grafo). Los diferentes pares origen-destino son los siguientes:

- Par origen-destino 1: Barcelona-Zaragoza. Arco 1. 313 km.
- Par origen-destino 2: Barcelona-Madrid. Arco 1 - Arco 2. 630.
- Par origen-destino 3: Barcelona-Valencia. Arco 4. 350 km.
- Par origen-destino 4: Barcelona-Sevilla. Arco 1 - Arco 2 - Arco 6. 1158 km.
- Par origen-destino 5: Zaragoza-Madrid. Arco 2. 317 km.
- Par origen-destino 6: Zaragoza-Valencia. Arco 1 - Arco 4. 663 km.
- Par origen-destino 7: Zaragoza-Sevilla. Arco 2 - Arco 6. 845 km.
- Par origen-destino 8: Madrid-Valencia. Arco 3. 358 km.
- Par origen-destino 9: Madrid-Sevilla. Arco 6. 528 km.
- Par origen-destino 10: Valencia-Sevilla. Arco 5. 654 km.

Para modelar el tráfico, se van a utilizar modelos entrópicos, para determinar el patrón de movimiento en cada periodo de tiempo t , los cuales son ampliamente utilizados debido principalmente a su simplicidad. Se utiliza el software GAMS (General Algebraic Modeling System) y se selecciona programación no lineal, también conocido como NLP (Nonlinear Programming). Para obtener la modelización del tráfico del problema test, se programa y resuelve la ecuación 3.1.

Para la realización de la programación, además de los arcos, nodos y pares origen destino, ya descritos en el presente capítulo, es necesario disponer de la estimación de la población de la ciudad j en el periodo de tiempo t (P_j^t), el número de kilómetros recorridos por un vehículo de la ciudad j en el periodo de tiempo t (ξ_j^t) y la proporción de los kilómetros que se recorren entre ciudades (μ_j^t).

Los valores referentes a la estimación de la población de la ciudad j en el periodo de tiempo t (P_j^t), se obtienen de los datos prospectivos del **Instituto Nacional de Estadística de España**.

El número de kilómetros recorridos por un vehículo de la ciudad j en el periodo de tiempo t (ξ_j^t), se obtienen a partir de datos de emisiones de la **Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia** (estadística CNMC sobre consumo de carburantes en el transporte por carretera y sus emisiones, que dispone de una base de datos entre los años 2003 y 2014). El número de kilómetros recorridos por un vehículo, no es un dato que se obtenga directamente de la fuente anteriormente comentada, sino que es necesario realizar una serie de transformaciones para poder llegar al dato buscado.

Modo de transporte	Tráfico Interurbano (10 ⁶ veh-km)	Parque total (vehículos)	Consumo (10 ⁶ litros)			Consumo Medio (l/100 km)
			Interurbano	Urbano	Total	
Motor gasolina (2004)						
Motos	1.229	1.612.482	80	43	122	6,5
Furgonetas	6.979	737.024	942	235	1.177	13,7
Coches	67.327	12.035.098	6.323	1.783	8.106	9,4
Todos	75.535	14.384.604	7.344	2.071	9.415	9,7
Motor diesel (2004)						
Camiones	30.482	2.419.908	9.054	578	9.632	29,7
Autobuses	1.424	56.957	400	55	455	28,1
Furgonetas	14.831	1.592.039	1.763	588	2.351	11,8
Coches	119.532	7.506.821	8.501	4.367	12.868	7,1
Todos	166.269	11.575.725	19.719	5.562	25.281	11,9

Figura 4.1: Tráfico, parque y consumo de petróleo por modo y tipo de combustible, España, año 2004.

Fuente: Dirección General Carreteras Anuario 2008.

Modo de transporte	Tráfico Interurbano (10 ⁶ veh-km)	Parque total (vehículos)	Consumo (10 ⁶ litros)			Consumo Medio (l/100 km)
			Interurbano	Urbano	Total	
Motor gasolina (2007)						
Motos	1.751	2.311.346	113	61	174	6,4
Furgonetas	7.317	676.665	999	250	1.248	13,5
Coches	55.912	11.624.686	5.251	1.481	6.732	9,2
Todos	64.980	14.612.697	6.363	1.795	8.158	9,5
Motor diesel (2007)						
Camiones	35.510	2.765.919	10.548	673	11.221	29,5
Autobuses	1.660	61.039	467	64	530	28,0
Furgonetas	19.020	1.759.041	2.249	750	2.999	11,7
Coches	135.566	10.135.488	9.642	4.967	14.609	7,0
Todos	191.756	14.660.448	22.906	6.454	29.366	11,7

Figura 4.2: Tráfico, parque y consumo de petróleo por modo y tipo de combustible, España, año 2004.

Fuente: Dirección General Carreteras Anuario 2008.

Los valores de la proporción de kilómetros que se recorren entre ciudades (μ_j^t) y la variable γ^t estima la proporción de viajes realizados en la red de carreteras por cada habitante, se obtienen a partir de los datos de las figuras 4.1 y 4.2.

Los resultados de la modelización de tráfico, la cual se obtiene de la introducción de todos los datos anteriormente comentados¹ en GAMS y la programación de la ecuación 3.1 son los siguientes:

¹Todos los datos utilizados para realizar la modelización del tráfico se encuentran en el enlace <http://nubr.co/diKuO2>

Tabla 4.1: Resultado modelo entrópico GAMS, utilizando optimización mediante programación no lineal.

GAMS	BARCELONA	ZARAGOZA	MADRID	VALENCIA	SEVILLA
BARCELONA	—	0,29	9,32	0,69	2,07
ZARAGOZA	0,72	—	4,11	3,04	1,31
MADRID	6,49	0,58	—	1,54	0,81
VALENCIA	1,39	3,77	8,18	—	0,81
SEVILLA	4,69	0,99	4,83	1,26	—
Constante de proporcionalidad 0,0000082458					

4.3. Modelización del comportamiento de los usuarios de vehículos

En esta tesis doctoral se han considerado cuatro tipos de vehículos i los cuales están disponibles en España en la actualidad o van a estarlo en el un futuro cercano. Los vehículos considerados son los vehículos convencionales (CT), vehículos alimentados por gas natural (GNV), los vehículos eléctricos de pila de combustible alimentados por hidrógeno (FCEV) y los vehículos eléctricos de batería (BEV).

Para poder modelizar el comportamiento de los usuarios de vehículos, se ha de determinar el valor de la previsión de ventas de vehículos totales en España a lo largo del tiempo, es decir, se ha de obtener el valor $\bar{g}_j^t$, que es la previsión de venta de vehículos totales durante el periodo de tiempo t en la ciudad j .

Para obtener este valor, se considera que las ventas de vehículos depende directamente de P^t y $\phi(\Delta PIB^t)$ donde P^t es la previsión de población existente en España en el periodo de tiempo t (en millones de habitantes) y $\phi(\Delta GDP^t)$ es un efecto multiplicador que transforma la variación del Producto Interior Bruto per cápita en el periodo t , tal y como indican los autores Funez-Guerra et al. (2016).

Este método se ha aplicado al caso español. Se han considerado tres escenarios (un caso base, uno optimista y otro pesimista) consistentes en una combinación de previsiones de la evolución de la población $\{P^t\}_{t \geq 2016}$ y del $\{\Delta GDP^t\}_{t \geq 2016}$. La estimación de la población se ha obtenido del Instituto Nacional de Estadística (INE). En el caso base se considera una población final de 45,4 millones de habitantes, de 44,3 en el caso pesimista y de 46,5 en el optimista. En la parte izquierda de la figura 4.3 se muestra la estimación del multiplicador $\phi(\Delta GDP)$ usando una aproximación básica Gaussiana Radial y en la parte derecha de la misma figura el pronóstico de ventas totales de vehículos $P^t \cdot \phi(\Delta GDP^t)$ para los tres escenarios considerados.

Considerando el escenario base de previsión de venta de vehículos totales en España (parte izquierda de la figura 4.3) y realizando una división proporcional

Figura 4.3: Multiplicador $\phi(\Delta GDP)$ para las ventas y previsión de ventas de vehículos en España.

en función del número de habitantes previstos P^t en cada una de las ciudades j , se obtiene el valor de $\bar{g}_j^t$.

El siguiente valor que se ha de calcular para poder modelar el comportamiento del usuario es $U_j^{m,t}$, que es la utilidad de la alternativa m para el usuario de la ciudad j en el periodo de tiempo t .

La utilidad va a depender fundamentalmente de los atributos considerados ((i) pv_s^t que es el precio de venta del vehículo tipo s en el periodo de tiempo t , en $k\text{€}$, (ii) pc_s^t es el precio del combustible en el periodo de tiempo t para cada tipo de vehículo s , en $\text{c€}/1\text{ l}$ equivalente diésel, (iii) $co_{j,s}^t$ es el grado de cobertura para la ciudad j para un vehículo tipo s en el periodo de tiempo t , en km , (iv) dr_s^t es la autonomía, o el número de km que un usuario puede recorrer utilizando el 100% del combustible disponible, en el periodo de tiempo t para un vehículo tipo s , en km , (v) rt_s^t es el tiempo que tarda un vehículo tipo s en recargar por completo su almacenamiento de combustible, desde el 0 hasta el 100% de su capacidad s en el periodo de tiempo t , en min y (vi) e_s^t son las emisiones de CO_2 generadas por un vehículo tipo s en el periodo de tiempo t) los cuales son evolutivos en el tiempo, y de los factores α ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$) que ponderan la importancia que los usuarios dan a cada uno de los atributos y que por tanto influyen en la proporción de vehículos de las diferentes tipologías que se venden.

La previsión de los atributos para cada uno de los vehículos considerados en el estudio, esta basada en estudios prospectivos y en la experiencia de los investigadores del Centro Nacional del Hidrógeno y se pueden ver en la figura 4.4.

Todos los atributos considerados para determinar la utilidad de cada tipo de vehículo, son dinámicos, es decir, evolucionan a lo largo del tiempo. Además, todos ellos, a excepción de la cobertura de la infraestructura de hidrógeno, son exógenos en el modelo propuesto e introducen supuestos basados en bibliografía y previsiones que dependen en gran medida de los progresos tecnológico y evo-

Figura 4.4: Previsión del valor de los atributos de los diferentes tipos de vehículos entre los años 2016 y 2045, (s^t).

lución de precios de energía, entre otros factores, en los años futuros. En este análisis, como es lógico, no se pueden incluir todas las incertidumbres existentes a la hora de realizar previsiones, por lo que se basa en datos bibliográficos de estudios prospectivos.

Para la determinación de los parámetros α , la forma habitual de proceder, es realizar encuestas especializadas a diferentes sectores de la población del país objeto de estudio, en el que se pregunta por los diferentes atributos considerados, de forma que tras el análisis de dichas encuestas se puede saber la importancia que cada usuario le da a cada atributo. En la presente tesis doctoral, al no disponer de recursos económicos para realizar las encuestas, se han tomado datos de encuestas realizadas en Alemania, tomando como referencia los estudios científicos realizados por Hackbarth and Madlener (2013).

Además de los valores α comentados anteriormente, es necesario obtener los vapores β (en concreto β_1 y β_2) que se utilizan en cada uno de los dos niveles del modelo logit anidado utilizado en la presente tesis doctoral, obteniéndose de la misma fuente que los valores α , es decir, de los estudios científicos realizados por Hackbarth and Madlener (2013).

Con el número de vehículos totales matriculados en cada ciudad j en cada periodo de tiempo t ($\bar{g}_j^t$) y la proporción de los mismos que son de hidrógeno, la cual se obtiene mediante el modelo logit anidado, se pueden conocer el número de vehículos eléctricos de pila de combustible $g_{j,s}^{a,t}$. Realizando el sumatorio de $g_{j,s}^{a,t}$ desde $t = 1$ hasta $t = 30$, se obtienen los vehículos eléctricos de pila de combustible existentes en las ciudades del caso de estudio².

4.4. Modelización de la cobertura

Se considera, principalmente por razones económicas y de operación, que las infraestructuras de repostaje de hidrógeno, se van a ubicar en las estaciones de repostaje de combustibles existentes en la actualidad, pues es factible (siempre que disponga de un espacio mínimo) poder ampliar su porfolio de productos e incluir el hidrógeno entre los combustibles que la infraestructura de repostaje ofrece a sus clientes.

Estas posibles estaciones de repostaje que pueden albergar el hidrógeno como combustible alternativo, se tratan de forma desagregada, aportando datos exactos y concretos cuando se encuentra en un arco del grafo, es decir, entre dos ciudades, y se tratan de forma agregada cuando la estación de repostaje susceptible de incluir el hidrógeno entre sus combustibles, esta ubicada en los nodos o ciudades.

Lo primero que se realiza es un análisis exhaustivo de las infraestructuras de repostaje de combustible existentes en los nodos y arcos que forman parte del grafo de estudio, para discriminar las que tienen capacidad de albergar una infraestructura de repostaje de hidrógeno (pues existirán muchas infraestructuras de repostaje que fundamentalmente por ubicación y/o falta de espacio no pueda albergar una infraestructura de repostaje de hidrógeno). Para realizar el análisis de dichas infraestructuras se realiza el siguiente procedimiento (el cual se puede observar en la figura 4.5):

- A partir del grafo objeto de estudio, y de la obtención del camino mínimo obtenido en la modelización de tráfico, se determinan las infraestructuras de repostaje de combustible existentes en los nodos y arcos (ciudades y principales carreteras que unen estas ciudades).
- Se utiliza la información existente en web del Ministerio de Industria, Energía y Turismo del Gobierno Español (<http://geoportalgasolineras.es/>) y se

²Todos los datos utilizados para realizar la modelización del comportamiento de los usuarios se encuentran en el enlace <https://goo.gl/L8TYVC>

Figura 4.5: Procedimiento de análisis de las estaciones de repostaje de combustible que potencialmente pueden albergar hidrógeno como combustible alternativo.

accede a un mapa de localización de infraestructuras de repostaje de combustible (al estar obligadas las estaciones de repostaje a inscribirse en un registro según la Orden ITC/2308/2007, de 25 de julio).

- Desde la base de datos del Ministerio de Industria, Energía y Turismo, mediante el link con Google Earth se puede acceder a las estaciones de repostaje de combustible, pudiendo analizar (tanto con la fotografía de los satélites como a ras de tierra, con la función Street View) las infraestructuras con capacidad de albergar el hidrógeno como combustible alternativo.
- Las infraestructuras de repostaje de combustible que tengan capacidad de incorporar el hidrógeno como combustible alternativo se consideran en el estudio y las que no disponen de espacio suficiente (alrededor de 50 m^2 , espacio mínimo disponible considerado) no se consideran.
- Con las estaciones de repostaje de combustible que forman parte del estudio, se las incluye en la base de datos, donde se les asigna un identificador, se indica el nodo o el arco al que pertenecen, las coordenadas exactas de su ubicación y el estado (si incorpora o no hidrógeno como combustible alternativo, pudiendo este estado cambiar en cada periodo de tiempo t).

Con el procedimiento descrito anteriormente y reflejado en la figura 4.5, se obtiene N_j es el número de estaciones de repostaje de combustible que son susceptibles de albergar hidrógeno entre sus combustibles alternativos en la ciudad j y N_a es el número de estaciones de repostaje de combustible que son susceptibles de albergar hidrógeno entre sus combustibles alternativos en el arco a . En

la figura 4.6 se pueden observar los valores N_j y N_a correspondientes al grafo de estudio.

Figura 4.6: Valores de N_j y N_a para el grafo de estudio.

Una vez analizadas las infraestructuras de repostaje de combustible con capacidad para albergar el hidrógeno como combustible alternativo, se va a desarrollar la matriz de distancias entre las estaciones de repostaje de cada uno de los 10 caminos mínimos que contempla el grado de estudio.

A partir de los datos comentados anteriormente, y su aplicación en las formulas descritas en el apartado correspondiente a la modelización de la cobertura en el capítulo de descripción de la metodología, se va a obtener:

- La cobertura en el par origen-destino $\omega = (j, j')$ definida como la máxima distancia entre dos estaciones de repostaje que incluyen hidrógeno como combustible alternativo consecutivas en la ruta correspondiente al camino mínimo que satisface el par origen-destino ω .
- Las variable $\eta_j(x_j^t)$ representa el grado de cobertura en los viajes realizados dentro de la ciudad j como una función del número de estaciones de repostaje x_j^t que deciden incluir el hidrógeno como combustible alternativo.

Con los dos valores anteriores, se determina finalmente el valor de $co_{j,s}^t$ que es el objeto final de este submodelo, siendo este submodelo retroalimentado por el resto de submodelos, indicando el estado de la infraestructura de repostaje de combustible (1 si alberga el hidrógeno como combustible alternativo y 0 si no alberga al hidrógeno como combustible alternativo)³.

³Todos los datos utilizados para realizar la modelización de la cobertura para los vehículos eléctricos de pila de combustible alimentados por hidrógeno, se encuentran en el enlace <https://goo.gl/bS42tw>

4.5. Modelización del comportamiento de los propietarios de las estaciones de repostaje

Para modelar el comportamiento de los propietarios de las estaciones de repostaje, es necesario disponer de los siguientes datos:

- Estimación de los FCEV que repostan en cada estación de repostaje que incluye hidrógeno como combustible alternativo.
- Estimación del beneficio de la infraestructura de repostaje que decide incluir el hidrógeno como combustible alternativo.
- Modelización del comportamiento de las infraestructuras de repostaje que deciden incorporar hidrógeno.
- Modelización de los incentivos o subsidios.

Para poder determinar los **FCEV que repostan en cada infraestructura de repostaje** que dispone el hidrógeno como combustible alternativo, se realizan las siguientes consideraciones:

- Se asume que las hidrogeneras existentes en los arcos o caminos mínimos definidos para viajar entre los diferentes nodos o ciudades, van a suministrar hidrógeno a los usuarios que realizan viajes interurbanos y que las hidrogeneras ubicadas en las ciudades van a suministrar hidrógeno a los vehículos que realizan viajes urbanos.
- Se asume que todas las hidrogeneras son igualmente atractivas (idénticos precios y servicios) y por lo tanto, la probabilidad de repostar en cada una de las estaciones de servicio i para cada vehículo que realiza el viaje dentro de un determinado par origen-destino ω en el periodo de tiempo t , $p_{i,\omega}^t$, será inversamente proporcional al número de estaciones de hidrogeneras existentes en las carreteras que forman parte el camino mínimo en el par origen-destino ω .

Como resultado de la modelización del tráfico, se dispone del número de viajes interurbanos que un usuario tipo de la ciudad j realiza en cada periodo de tiempo t al resto de ciudades que forman parte del grafo de estudio, disponiéndose de esta forma los kilómetros que realiza el usuario de la ciudad j en cada uno de los arcos. De la misma forma, se determina el número de kilómetros que un usuario tipo de la ciudad j realiza en la propia ciudad. Por lo tanto, como resultado de la modelización del tráfico se conoce perfectamente la distribución de los kilómetros realizados por un usuario de una ciudad j en cada uno de los periodos de tiempo t .

Como resultado de la modelización del comportamiento de los usuarios de vehículos, se determina cuantos usuarios tipo de una ciudad j decide adquirir FCEV en cada periodo de tiempo t .

Por lo tanto, con los resultados de la modelización del tráfico (distribución de los kilómetros recorridos por un usuario tipo de la ciudad j en cada periodo de tiempo t) y los resultados de la modelización del comportamiento de los usuarios de FCEV (número de usuarios tipo de la ciudad j que deciden comprar un FCEV en cada periodo de tiempo t), se puede obtener el número de kilómetros realizado en la zona de influencia de la hidrogenera y por tanto, el número de kilogramos de hidrógeno que la hidrogenera puede suministrar (dividiendo los kilómetros que le corresponderían a la hidrogenera entre 100, pues se considera que con 1 kilogramo de hidrógeno se pueden realizar 100 km).

Para poder estimar el **beneficio de la infraestructura de repostaje de hidrógeno**, se realizan las siguientes consideraciones:

- Los costes de operación y mantenimiento de las hidrogeneras son fijos y determinados para cada periodo de tiempo t .
- Los costes de operación y mantenimiento son los mismos para todas las hidrogeneras que deciden abrir en el mismo periodo de tiempo t .
- Se considera el desarrollo tecnológico al que las hidrogeneras se van a ver sometidas, lo que va a repercutir en un descenso de los costes de inversión y por lo tanto de los costes de amortización a medida que avanza el tiempo.

El beneficio obtenido por la hidrogenera i en el periodo de tiempo t , dependerá de s_i^t (subsidio que la hidrogenera i recibe en el periodo de tiempo t), de γ^t (mide el margen de beneficio que la hidrogenera obtiene por la venta del kilogramo de hidrógeno en el periodo de tiempo t), de c_i^t (que es la cantidad de kilogramos de hidrógeno vendido por la hidrogenera i en el periodo de tiempo t) y de κ_{it}^t (que responde a los costes de amortización de la inversión, operación y mantenimiento)⁴.

El valor de s_i^t es el resultado del modelo de optimización, estando este valor compuesto por 2 valores que son:

- Cuantía económica que se aporta en concepto de subsidio a la inversión para la hidrogenera i en el periodo de tiempo t .
- Cuantía económica que se aporta en concepto de subsidio por kilogramo de hidrógeno vendido por la hidrogenera i en el periodo de tiempo t .

Los valores de s_i^t se aportan durante 15 años, desde el año en que la infraestructura de repostaje decide incorporar el hidrógeno como combustible alternativo, pudiéndose realizar dicha apertura entre los años 2016 y 2030, lo que se traduce en que la totalidad del periodo de estudio estará comprendido entre los años 2016 y 2045.

Como se ha comentado anteriormente, el valor de s_i^t es el resultado del modelo de optimización, pero para que el modelo de localización comience con el proceso

⁴Todos los datos utilizados para realizar la modelización del comportamiento de los propietarios de las infraestructuras de repostaje de hidrógeno se encuentran en el enlace <https://goo.gl/nwVUYc>

de optimización propiamente dicho, hay que introducirle unos valores iniciales, siendo estos valores iniciales los mostrados en la figura 4.7.

Figura 4.7: Valores de s_i^t inicialmente introducidos al modelo.

El valor de γ^t , mide el margen de beneficio que la infraestructura de repostaje que decide incluir hidrógeno como combustible alternativo obtiene por la venta del kilogramo de hidrógeno en el periodo de tiempo t , es decir, el precio de venta del kilogramo de H_2 para cada periodo de tiempo t . Existen diferentes estudios prospectivos que indican diferentes valores de precio del kg de H_2 , siendo considerado en la presente tesis doctoral el aportado por Company (2011), pudiéndose observar los datos en la gráfica 4.8.

Figura 4.8: Prospectiva de precio de venta de hidrógeno γ^t para cada periodo de tiempo t .

El valor de c_i^t (son los kilogramos de hidrógeno vendidos por la hidrogenadora i en el periodo de tiempo t) se obtiene de la interacción de la modelización del tráfico con la modelización del comportamiento de los usuarios de los vehículos.

Para obtener el valor de $\kappa_{t'}^t(i)$, que corresponde a los costes de amortización de la inversión, operación y mantenimiento, existen diferentes estudios prospectivos, siendo el tomado como referencia en la presente tesis doctoral el desarrollado por Melaina and Penev (2013). Este informe desarrolla un estudio de los costes de inversión y de operación y mantenimiento de hidrogeneras de diferentes capacidades en Estados Unidos. Para la presente tesis doctoral, se ha desplazado en el tiempo los datos de costes de inversión, operación y mantenimiento de las hidrogeneras con respecto al estudio desarrollado por Melaina and Penev (2013), pudiéndose observar estos datos en la figura 4.5

De la misma forma, se considera que para los costes de inversión, el propietario de la infraestructura de repostaje que va a implementar el hidrógeno como combustible alternativo, solicita un préstamo con unas condiciones muy favorables que son las siguientes:

- Tipo de interés de 0,33 %.
- Tipo de interés efectivo de 0,00329.
- Duración del préstamo 15 años.
- Frecuencia de pago anual.
- Sistema Francés de pago, el se caracteriza por ser un sistema de amortización de cuotas constantes.
- No se considera periodo de cadencia.

Los costes de operación y mantenimiento, se consideran como un porcentaje de la inversión inicial en el primer año de adquisición de la infraestructura de repostaje de combustible alternativo y para los años sucesivos se considera un incremento anual del 1,5 %. En la tabla 4.5 se definen unos costes de operación y mantenimiento, para hidrogeneras instaladas en una localización nueva. No obstante, como en la presente tesis doctoral se considera que las hidrogeneras se albergarán en las infraestructuras de repostaje existente, estos costes de operación y mantenimiento serán menores.

Tabla 4.2: Costes inversión, operación y mantenimiento para hidrogeneras de diferentes capacidades.

Atributos HRS	Ud	Estado del arte	Primeras HRS	Mayor N° HRS	HRS gran capacidad
Periodo de tiempo	Años	2015-2017	2017-2020	Después 2020	Después 2025
Capacidad	kg/día	160	450	600	1500
Utilización	Porcentaje	57	74	76	80
Suministrado	kg/día	91,2	333	456	1200
Coste capital	Millones €	1,961	2,072	2,2866	3,737
Coste por capacidad	Miles € por kg/d	12,26	4,60	3,81	2,49
Reducc VS estado arte	Porcentaje	na	62	69	80
Costes fijos O&M	% Coste capital/año	10	7	7	7

Para poder **modelizar los incentivos o subsidios** que ha de aportar el Gobierno Español a los inversores que decidan abrir una hidrogenera, se parte de los valores de s_i^t supuestos inicialmente y reflejados en la figura 4.7, para que

después de ejecutar el algoritmo genético, poder obtener los valores ψ^t y ϕ^t , siendo estos, los mejores valores que el algoritmo es capaz de obtener, después de las interacciones realizadas. ψ^t representa el subsidio aportado para amortizar la inversión de la hidrogenera, mientras que ϕ^t incentivan a las hidrogeneras mas eficientes, que son aquellas, que debido a su localización, venden mas cantidad de hidrógeno (H_2).

5

Resultados y discusión

En el presente capítulo, se muestran los resultados obtenidos tras la ejecución de la metodología propuesta a los siguientes casos de estudio:

1. Estudio para el grafo descrito (5 ndos y 6 arcos), considerando subsidios a la amortización de la inversión y a los kg de H_2 suministrados por la hidrogenera.
2. Extrapolación de los resultados obtenidos para el caso de estudio (1), a la totalidad de España.
3. Estudio para el grafo descrito (5 nodos y 6 arcos), considerando subsidios a la amortización de la inversión, a los kg de H_2 suministrados por la hidrogenera y a los subsidios por la compra de FCEV.
4. Extrapolación de los resultados obtenidos para el caso de estudio (3), a la totalidad de España.

Los resultados concretos que se van a mostrar para cada uno de los casos de estudio anteriormente comentados son los siguientes:

- Número y capacidad de las hidrogeneras.
- Localización exacta de las hidrogeneras.
- Número de FCEV.
- kg de H_2 suministrados por las hidrogeneras.
- km recorridos por los FCEV.
- Energía renovable necesaria para generar los kg de H_2 .
- t de CO_2 ahorradas por uso de H_2 .
- Combustible fósil ahorrado, en m^3 , por uso de H_2 .
- Subsidio para amortizar la inversión de la hidrogenera, ψ^t .

- Subsidio al kg H_2 vendidos, ϕ^t .
- Subsidio a la adquisición de FCEV.
- Subsidios totales.
- Beneficios económicos menores emisiones CO_2 .
- Capacidad de suministro de H_2 de las hidrogeneras.
- Comparación de los resultados obtenidos con los planes de movilidad de los principales países europeos.
- Cuantificación económica para la introducción del H_2 como combustible alternativo.

A continuación se desarrollan cada uno de los apartados anteriormente comentados, mostrando los principales resultados.

5.1. Número y capacidad de las hidrogeneras

Un resultado obtenido con el tratamiento de la información que aporta la metodología desarrollada en la presente tesis doctoral, es el número de estaciones de repostaje que deciden incluir el hidrógeno en cada periodo de tiempo t , el número total de estaciones de repostaje que deciden incluir hidrógeno operativas en el periodo de estudio y la capacidad de generación de hidrógeno de las hidrogeneras operativas. El número de infraestructuras de repostaje que deciden incluir el hidrógeno como combustible alternativo en cada periodo de tiempo t y el total acumulado para los diferentes caso de estudio, se pueden observar en la figura 5.1.

Figura 5.1: Nº estaciones de repostaje que incluyen hidrógeno en cada periodo de tiempo t y Nº estaciones de repostaje que incluyen hidrógeno acumuladas periodo de estudio. (a) Sin subsidio compra FCEV grafo estudio (b) Con subsidio compra FCEV grafo estudio (c) Sin subsidio compra FCEV prospectiva España (d) Con subsidio compra FCEV prospectiva España.

Del análisis de la figura 5.1 se puede observar diferencias importantes cuando se subsidia la adquisición de FCEV, pues este subsidio hace que existan mas FCEV y por lo tanto, son necesarias mayor numero de hidrogeneras.

También es posible determinar el tamaño de las infraestructuras de repostaje

de hidrógeno desplegadas para los diferentes casos de estudio, pues en función del año de apertura, el tamaño de la infraestructura es diferente, debido fundamentalmente al desarrollo tecnológico que van a sufrir los componentes que forman las estaciones de repostaje de hidrógeno (Ver tabla 5.1).

Del análisis de la tabla 5.1 se observa que de las hidrogeneras de 160 kg/día de capacidad instaladas en los periodos iniciales, se pasa a las hidrogeneras con una capacidad de 600 kg/día, para posteriormente pasar a las hidrogeneras con una capacidad de 1.500 kg/día, siendo poco utilizadas las hidrogeneras de 450 kg/día de capacidad, motivado fundamentalmente porque con las hidrogeneras abiertas en el primer año (160 kg/día) es suficiente para abastecer los FCEV adquiridos durante los primeros años, no siendo necesario realizar aperturas de hidrogeneras en los 2 o 3 años siguientes, pasando de esta forma a hidrogeneras de mayor tamaño (600 y 1.500 kg/día).

Tabla 5.1: Tamaño de las hidrogeneras acumuladas en el periodo de estudio. (a) Sin subsidio compra FCEV grafo estudio (b) Con subsidio compra FCEV grafo estudio (c) Sin subsidio compra FCEV prospectiva España (d) Con subsidio compra FCEV prospectiva España.

	(a)	(b)	(c)	(d)
HRS 160	11	11	73	73
HRS 450	0	2	0	13
HRS 600	7	64	46	425
HRS 1.500	75	72	498	478
HRS TOTAL	93	149	618	989

5.2. Localización exacta de las hidrogeneras

Uno de los resultados obtenidos con el tratamiento de la información que aporta la metodología desarrollada en la presente tesis doctoral, es la localización exacta de las estaciones de repostaje que deciden incorporar el hidrógeno como combustible alternativo en cada periodo de tiempo t , pudiendo de esta forma disponer de un mapa donde se van a reflejar las infraestructuras de repostaje de hidrógeno que la metodología considera óptimas.

La localización exacta de las infraestructuras de repostaje de hidrógeno o hidrogeneras, solo se va a mostrar para el caso de estudio (sin considerar y considerando subsidios a la compra de FCEV), pues los datos prospectivos para España indican números aproximados, pero no se estudia en detalle la red y por tanto, no se puede concretar la ubicación de las hidrogeneras.

Cuando se estudia el comportamiento de las infraestructuras de repostaje, se realiza un estudio profundo de todas las infraestructuras de repostaje existentes a nivel nacional, determinando las que potencialmente pueden albergar (por diferentes cuestiones de índole técnica) hidrógeno como combustible alternativo.

Figura 5.2: Localización de las hidrogeneras en los diferentes periodos de tiempo t , sin considerar subvención a la adquisición de FCEV.

Figura 5.3: Localización de las hidrogeneras en los diferentes periodos de tiempo t , considerando subvención a la adquisición de FCEV.

Estas infraestructuras están localizadas y referenciadas mediante sus coordenadas UTM. Cuando la metodología desarrollada en la presente tesis doctoral se aplica al caso de estudio, se obtiene como resultado, el número de infraestructuras que deciden incorporar el hidrógeno como combustible alternativo en cada periodo de tiempo t y la infraestructura de repostaje exacta que toma la decisión de abrir, pudiendo posteriormente mediante sus coordenadas UTM asociadas, localizarlas espacialmente y reflejarlas en diferentes gráficos.

En las figuras 5.2 y 5.3 se puede observar la localización exacta de las infraestructuras que deciden incorporar hidrógeno como combustible alternativo en diferentes periodos de tiempo t , para el caso de estudio sin considerar y considerando subvención a la adquisición de FCEV respectivamente.

5.3. Número de FCEV

Un dato relevante, que se pueden obtener con la información que aporta la metodología desarrollada en la presente tesis doctoral, es el número de usuarios que deciden comprar un vehículo eléctrico de pila de combustible alimentado por hidrógeno (FCEV) en cada periodo de tiempo t , el número total de vehículos eléctricos e pila de combustible alimentados por hidrógeno en el periodo de estudio (FCEV), y el porcentaje que suponen estos vehículos en el total del parque automovilístico, suponiendo que los vehículos eléctricos de pila de combustible (FCEV) tienen una vida útil de 12 años, según información técnica aportada por los diferentes fabricantes. Toda esta información se puede observar en la figura 5.4.

Figura 5.4: Nº FCEV en cada periodo de tiempo t y Nº FCEV acumulados en el periodo de estudio. (a) Sin subsidio compra FCEV grafo estudio (b) Con subsidio compra FCEV grafo estudio (c) Sin subsidio compra FCEV prospectiva España (d) Con subsidio compra FCEV prospectiva España.

Del análisis de la figura 5.4 se observan diferencias importantes cuando se subsidia a los usuarios para la compra de FCEV, pues esta subvención hace que los usuarios que han de comprar un vehículo, al ser el coste inferior y similar al de resto de vehículos de combustibles alternativos, seleccionen el FCEV, fundamentalmente por sus ventajas relacionadas con tiempo de recarga y autonomía.

De la misma forma, se puede determinar la penetración del FCEV, en porcen-

taje, pues se conocen las previsiones de venta de vehículos durante los próximos años y el número de FCEV durante los siguientes años. (Ver figura 5.5).

Figura 5.5: % FCEV vs matriculaciones en cada periodo de tiempo t y % FCEV acumulados vs matriculaciones totales periodo de estudio. (a) Sin subsidio compra FCEV (b) Con subsidio compra FCEV.

Del análisis de la gráfica 5.5, se desprende que con el subsidio a la compra de FCEV, se consigue que la penetración del hidrógeno como combustible alternativo sea mayor. De la misma forma, se observa una tendencia creciente durante los primeros 15 años, con una estabilización durante los siguientes 15 años, motivado fundamentalmente por la consideración de que la vida útil de los FCEV es de 12 años, compensándose en ciertos periodos de tiempo las nuevas matriculaciones con la salida del mercado de los FCEV que han excedido su vida útil.

5.4. t de H_2 suministrados por las hidrogeneras

Uno de los resultados que se pueden obtener con la información que aporta la metodología desarrollada en la presente tesis doctoral, es el número de kilogramos o toneladas de hidrógeno suministrado por las diferentes infraestructuras de repostaje que incluyen el hidrógeno como combustible alternativo en cada periodo de tiempo t y el número total de kilogramos o toneladas de hidrógeno suministrado por las diferentes infraestructuras de repostaje que incluyen el hidrógeno como combustible alternativo en el periodo de estudio. Toda esta información se puede observar en la figura 5.6.

Figura 5.6: t H_2 en cada periodo de tiempo t y t H_2 acumuladas periodo de estudio. (a) Sin subsidio compra FCEV grafo estudio (b) Con subsidio compra FCEV grafo estudio (c) Sin subsidio compra FCEV prospectiva España (d) Con subsidio compra FCEV prospectiva España.

Del análisis de la figura 5.6 se puede observar diferencias importantes cuando se subsidia a los usuarios para la compra de FCEV, pues esta subvención hace que los usuarios que han de comprar un vehículo, al ser el coste inferior y similar al de resto de vehículos alternativos, seleccionan el FCEV, por sus ventajas relacionadas con tiempo de recarga y autonomía, lo que se traduce en mayor consumo de kilogramos o toneladas de hidrógeno consumidas en cada periodo de tiempo t y en el total del periodo de estudio.

5.5. km recorridos por los FCEV

Un dato que se puede obtener de la metodología propuesta en la presente tesis doctoral, es el número de kilómetros que los vehículos eléctricos de pila de combustible alimentados por hidrógeno pueden realizar en cada periodo de tiempo t y en el total del periodo de estudio. Los kilómetros recorridos están directamente relacionados con los kilogramos de hidrógeno consumidos, al considerar que 1 kilogramo de hidrógeno aporta la suficiente energía para recorrer 100 kilómetros. Por este motivo, no se incluyen tablas donde se visualicen los resultados, por ser idénticas a las reflejadas en el apartado de kilogramos o toneladas de hidrógeno.

5.6. Energía renovable necesaria para generar los kg de H_2

Un resultado de especial interés, que se pueden obtener con la información que aporta la metodología desarrollada en la presente tesis doctoral, es la energía eléctrica excedentaria procedente de energías renovables que sería necesaria para generar el hidrógeno que se necesitaría para alimentar a los FCEV en cada periodo de tiempo t y la cantidad total de excesos de energías renovables necesarios en el periodo de estudio. Este dato se obtiene a partir de los kilogramos de hidrógeno necesarios en cada periodo de tiempo t , a partir del dato de la cantidad de energía eléctrica necesaria para generar un kilogramo de hidrógeno, que en este caso se considera 65 kWh/kgH_2 . Toda esta información se puede observar en la figura 5.7.

Figura 5.7: GWh energía renovable excedentaria para generación de H_2 en cada periodo de tiempo t y en el periodo de estudio. (a) Sin subsidio compra FCEV grafo estudio (b) Con subsidio compra FCEV grafo estudio (c) Sin subsidio compra FCEV prospectiva España (d) Con subsidio compra FCEV prospectiva España.

Del análisis de la figura 5.7 se puede observar diferencias importantes cuando se subsidia a los usuarios para la compra de FCEV, pues esta subvención hace que los usuarios que han de comprar un vehículo, al ser el coste inferior y similar al de resto de vehículos alternativos, seleccionan el FCEV, por sus ventajas relacionadas con tiempo de recarga y autonomía, lo que se traduce en mayor

consumo de kilogramos o toneladas de hidrógeno y por lo tanto en una mayor cantidad de excesos de energías renovables necesarios, en cada periodo de tiempo t y en el total del periodo de estudio.

Este hecho es de vital importancia, pues puede hacer que las energías renovables tengan una mayor penetración en el mix energético nacional, al ser una herramienta de utilidad para gestionar los excesos de estas energías renovables, mediante su transformación en hidrógeno y posterior utilización en movilidad como combustible alternativo.

5.7. t de CO_2 ahorradas por uso de H_2

Uno de los resultados de mayor importancia e impacto para la sociedad, que se pueden obtener con la información que aporta la metodología desarrollada en la presente tesis doctoral, es el ahorro de emisiones de gases de efecto invernadero asociados al uso de hidrógeno como combustible alternativo. Centrando el foco en las emisiones de CO_2 ahorradas por el uso de hidrógeno como combustible alternativo, es posible su cuantificación, pues se conocen los kilómetros que realiza un usuario tipo de la ciudad j en cada periodo de tiempo t y se conoce el numero de usuarios tipo de la ciudad j que decide adquirir un FCEV en cada periodo de tiempo t .

Con estos datos y el factor de conversión de $2,46 \text{ kgCO}_2/\text{l}$ de combustible fósil, se pueden obtener las t CO_2 ahorradas en cada periodo de tiempo t y en el periodo total de estudio. Toda esta información se puede observar en la figura 5.8.

Figura 5.8: t CO_2 ahorradas como consecuencia del uso del hidrógeno como combustible alternativo en cada periodo de tiempo t y en el periodo de estudio. (a) Sin subsidio compra FCEV grafo estudio (b) Con subsidio compra FCEV grafo estudio (c) Sin subsidio compra FCEV prospectiva España (d) Con subsidio compra FCEV prospectiva España.

Del análisis de la figura 5.8 se puede observar diferencias importantes cuando se subsidia a los usuarios para la compra de FCEV, pues esta subvención hace

que los usuarios que han de comprar un vehículo, al ser el coste inferior y similar al de resto de vehículos alternativos, seleccionan el FCEV, por sus ventajas relacionadas con tiempo de recarga y autonomía, lo que se traduce en mayor consumo de kilogramos o toneladas de hidrógeno, lo cual implica una mayor cantidad de t CO_2 ahorradas, en cada periodo de tiempo t y en el total del periodo de estudio.

5.8. Combustible fósil ahorrado, en m^3 , por uso de H_2

Uno de los resultados que se pueden obtener con la información que aporta la metodología desarrollada en la presente tesis doctoral, es el ahorro de combustibles fósiles como consecuencia del uso de hidrógeno como combustible.

Es factible cuantificar el ahorro de combustible fósil, conociendo los kilogramos de hidrógeno consumidos en cada periodo de tiempo t y el factor de conversión de que 1 kg de hidrógeno es el equivalente aproximadamente a 6 litros de combustible fósil. Toda esta información se puede observar en la figura 5.9.

Esta menor cantidad de consumo de combustible fósil, supone una menor dependencia del exterior, pues en la presente tesis doctoral, se considera que el hidrógeno es generado mediante excedentes de energías renovables. Al tener menor dependencia de los combustibles fósiles, se logra una mayor seguridad de suministro y una balanza de pagos desde el punto de vista energético mas favorable.

Figura 5.9: m^3 combustible fósil ahorrados como consecuencia del uso del hidrógeno como combustible alternativo en cada periodo de tiempo t y en el periodo de estudio. (a) Sin subsidio compra FCEV grafo estudio (b) Con subsidio compra FCEV grafo estudio (c) Sin subsidio compra FCEV prospectiva España (d) Con subsidio compra FCEV prospectiva España.

Del análisis de la figura 5.9 se pueden observar diferencias importantes cuando se subsidia a los usuarios para la compra de FCEV, pues esta subvención hace que los usuarios que han de comprar un vehículo, al ser el coste inferior y similar al de resto de vehículos alternativos, seleccionan el FCEV, lo que se traduce en mayor consumo de kilogramos o toneladas de hidrógeno, lo cual implica una mayor cantidad de m^3 de combustible fósil ahorrado o no consumido, en cada periodo de tiempo t y en el total del periodo de estudio.

5.9. Subsidio para amortizar la inversión de la hidrogenera, ψ^t .

Un resultado de vital importancia para el estado Español, que se pueden obtener con la información que aporta la metodología desarrollada en la presente tesis doctoral, es el subsidio que el Gobierno Español ha de aportar, como apoyo a las infraestructuras que deciden incluir el hidrógeno como combustible alternativo. Este subsidio ψ^t se calcula de forma anual, es decir, para cada uno de los periodos de tiempo t que forman parte del periodo de estudio, y esta enfocado a ayudar a la amortización de las infraestructuras. Esta información se puede observar en la figura 5.10.

Figura 5.10: Subsidio aportado por el Gobierno Español para amortizar infraestructuras que incluyen hidrógeno como combustible alternativo ψ^t en cada periodo de tiempo t y para cada infraestructura. (a) Sin subsidio compra FCEV grafo estudio (b) Con subsidio compra FCEV grafo estudio.

Con el valor de ψ^t en cada periodo de tiempo t , conociendo que la infraestructura de repostaje se subsidia durante 15 años, a contar desde el año en que la infraestructura de repostaje decide incluir hidrógeno como combustible alternativo, y conociendo el número de infraestructuras que deciden incluir el hidrógeno como combustible alternativo en cada periodo de tiempo t , se puede obtener la cantidad de recursos económicos que el Gobierno Español ha de en cada periodo de tiempo t y en el global del periodo de estudio. Esta información se puede observar en la figura 5.11.

Del análisis de las figuras 5.10 y 5.11 se pueden observar diferencias importantes cuando se subsidia a los usuarios para la compra de FCEV, pues esta subvención hace que los usuarios que han de comprar un vehículo, al ser el coste inferior y similar al de resto de vehículos alternativos, seleccionan el FCEV, lo que se traduce en un mayor número de infraestructuras de repostaje que incluyen el hidrógeno como combustible alternativo en cada periodo de tiempo t y en el total del periodo de estudio, lo cual se traduce en mayor cantidad de recursos que el Gobierno Español ha de aportar.

Figura 5.11: Recursos económicos, en €, que ha de aportar el Gobierno Español en cada periodo de tiempo t para apoyar la amortización de las infraestructuras que deciden incluir hidrógeno como combustible alternativo. (a) Sin subsidio compra FCEV grafo estudio (b) Con subsidio compra FCEV grafo estudio (c) Sin subsidio compra FCEV prospectiva España (d) Con subsidio compra FCEV prospectiva España.

5.10. Subsidio al kg H_2 vendidos, ϕ^t

Al igual que en el apartado anterior, un resultado de vital importancia para el estado Español, que se pueden obtener con la información que aporta la metodología desarrollada en la presente tesis doctoral, es el subsidio aportado por el Gobierno Español como apoyo a la venta de kilogramos de hidrógeno suministrado por las infraestructuras que deciden incluir el hidrógeno como combustible alternativo.

Este subsidio ϕ^t se calcula de forma anual para cada uno de los periodos de tiempo t que forman parte del periodo de estudio y esta enfocado a ayudar a la infraestructuras de repostaje que incluyen hidrógeno como combustible alternativo.

Se va a subsidiar los kilogramos de hidrógeno asociados a los vehículos eléctricos de pila de combustible nuevos que se ponen en servicio cada año, o dicho de otra forma, los kilogramos de hidrógeno que consume el vehículo eléctrico de pila de combustible durante su primer año de vida, pues es el resultado aportado por el modelo de optimización. Esta información se puede observar en la figura 5.12.

Figura 5.12: Subsidio aportado por el Gobierno Español para la venta de kilogramos de hidrógeno a las infraestructuras que incluyen hidrógeno como combustible alternativo ϕ^t en cada periodo de tiempo t para los kilogramos recorridos por los FCEV durante su primer año de vida. (a) Sin subsidio compra FCEV grafo estudio (b) Con subsidio compra FCEV grafo estudio.

Con el valor de ϕ^t en cada periodo de tiempo t , conociendo los kilogramos de hidrógeno que se suministran en cada periodo de tiempo t y teniendo en cuenta que se subsidian los kilogramos correspondientes a los vehículos nuevos que se implantan cada periodo de tiempo t , se puede obtener la cantidad de recursos económicos que el Gobierno Español ha de en cada periodo de tiempo t y en el global del periodo de estudio. Esta información se puede observar en la figura 5.13.

Del análisis de las figuras 5.12 y 5.13 se pueden observar diferencias impor-

tantes cuando se subsidia a los usuarios para la compra de FCEV, pues esta subvención hace que los usuarios que han de comprar un vehículo, al ser el coste inferior y similar al de resto de vehículos alternativos, seleccionan el FCEV, lo que se traduce en un mayor número de kilogramos de hidrógeno suministrados en cada periodo de tiempo t y en el total del periodo de estudio, lo cual se traduce en mayor cantidad de recursos que el Gobierno Español ha de aportar.

Figura 5.13: Recursos económicos, en €, que ha de aportar el Gobierno Español en cada periodo de tiempo t para apoyar la venta de kilogramos de hidrógeno asociados a los FCEV nuevos que se ponen en circulación cada periodo, del cual se benefician las hidrogeneras. (a) Sin subsidio compra FCEV grafo estudio (b) Con subsidio compra FCEV grafo estudio (c) Sin subsidio compra FCEV prospectiva España (d) Con subsidio compra FCEV prospectiva España.

5.11. Subsidio a la adquisición de FCEV

Dentro de los casos de estudio de la presente tesis doctoral, se ha realizado el caso de subsidiar la compra de FCEV.

La forma de considerar este subsidio en el modelo, es modificar el atributo correspondiente al precio de compra del FCEV, $p_{v_s}^t$, en k€ (ver figura 5.14).

Figura 5.14: Subsidio FCEV. (a) Subsidio unitario (€/ud) (b) Comparativa entre precio del FCEV con y sin subsidio (k€/ud).

Figura 5.15: Subsidio anual y acumulado que el Gobierno Español aporta para la adquisición de FCEV. (a) Caso de estudio (b) Proyección al caso Español.

Con el valor de la subvención unitaria del FCEV y con el número de FCEV, se puede obtener el valor del subsidio que el Gobierno Español ha de aportar en concepto de subvención a la adquisición de FCEV.

Adicionalmente, realizando el sumatorio desde $t = 1$ hasta $t = 30$ del subsidio que el Gobierno Español ha de suministrar a los FCEV, se puede obtener la

cantidad total a aportar en este concepto durante el periodo completo de estudio (Ver figura 5.15).

No obstante, únicamente se plantea el subsidio a la compra de FCEV durante los 10 primeros años del periodo de estudio, pues posterior a este periodo, los FCEV no necesitaran subsidio al ser el coste igual al del resto de vehículos considerados en el estudio.

Del análisis de la figura 5.15 se puede observar que cuando se subsidia la adquisición de FCEV, los usuarios que han de comprar un vehículo, al ser el coste inferior y similar al de resto de vehículos alternativos, seleccionan el FCEV, por sus ventajas relacionadas con tiempo de recarga y autonomía, lo que se traduce en un mayor subsidio que el Gobierno Español ha de aportar en cada periodo de tiempo t y en el total del periodo de estudio.

5.12. Subsidios totales

En este apartado, se van a analizar los subsidios totales que ha de aportar el Gobierno Español para la introducción de la movilidad sostenible basada en hidrógeno.

Se van a indicar los subsidios anuales que el Gobierno Español ha de aportar (conceptos de subsidio a la amortización de la infraestructura, subsidio por kg de H_2 vendidos) para el caso de estudio sin y con subvención a la venta de FCEV y para el caso de España sin y con subvención a la venta de FCEV.

En las figuras 5.16, 5.17, 5.18 y 5.19 se pueden observar los principales resultados.

Se ha representado el subsidio total que ha de aportar el Gobierno Español mediante diagramas de barras, en el que las diferentes cuantías se reflejan en diferentes colores, siendo el subsidio total la sumatoria de las barras anteriormente comentadas.

Figura 5.16: Subsidios que el Gobierno Español ha de aportar para el caso de estudio sin considerar subsidio a la adquisición de FCEV. (a) Subsidio anual en (€/año) en cada periodo de tiempo t (b) Subsidio acumulado durante el periodo de estudio (€)

Del análisis de la figura 5.16, que se corresponde con el caso de estudio sin considerar subsidio a la venta de FCEV, se observa lo siguiente:

1. Durante los primeros años, el subsidio de mayor importancia es el relacionado con el apoyo a la amortización de las infraestructuras, debido a la cantidad reducida de FCEV, lo que conlleva la venta de pocos kilogramos de hidrógeno y por tanto subsidio reducido a la venta de kilogramos de hidrógeno.
2. A medida que pasa el tiempo, aumenta la cantidad de subsidio a los kilogramos de hidrógeno y baja el subsidio a la amortización de la infraestructura de repostaje, siendo este hecho debido a la existencia de red de infraestructuras suficiente y al crecimiento de la cantidad de FCEV existentes en el mercado, y por tanto la cantidad de kilogramos de hidrógeno consumidos.

3. Los subsidios con mayor intensidad se producen en los años centrales del periodo de estudio, siendo el subsidio reducido en los primeros y últimos años del periodo de estudio.
4. Al final del periodo de estudio, se cumple de forma aproximada, que del subsidio total aportado por el gobierno Español, $1/3$ se corresponde al subsidio por venta de kilogramos de hidrógeno y los $2/3$ restantes al subsidio a la amortización de las infraestructuras de repostaje que incluyen el hidrógeno como combustible alternativo.

Figura 5.17: Subsidios que el Gobierno Español ha de aportar para el caso de España sin considerar subsidios a la adquisición de FCEV. (a) Subsidio anual en (€/año) en cada periodo de tiempo t (b) Subsidio acumulado durante el periodo de estudio (€)

Las conclusiones que se obtienen del análisis de la figura 5.17, correspondientes con el caso Español sin considerar subsidio a la venta de FCEV, son las mismas que las de la figura 5.16, que se corresponde con el caso de estudio sin considerar subsidio a la venta de FCEV, al obtenerse los resultados del caso Español, como proyección de los datos del caso de estudio.

Del análisis de la figura 5.18, que se corresponde con el caso de estudio considerando el subsidio a la venta de FCEV, se observa lo siguiente;

1. Durante los primeros años, el subsidio de mayor importancia es el relacionado con las infraestructuras, debido a la cantidad reducida de FCEV, lo que conlleva la venta de pocos kilogramos de hidrógeno y por tanto subvención reducida a la venta de kilogramos de hidrógeno y a la venta de FCEV.
2. Entre el año 3 y 10 del periodo de estudio, el subsidio que tiene mayor importancia es el correspondiente a la venta de vehículos, seguida del subsidio a la infraestructura y el subsidio a los kilogramos de hidrógeno.
3. El subsidio con mayor intensidad se produce entre los años 3 y 10 del periodo de estudio, pues el subsidio por venta de FCEV solo es efectiva durante los 10 primeros años, teniendo dicho subsidio un peso importante en el total de los subsidios que ha de aportar el Gobierno Español.

Figura 5.18: Subsidios que el Gobierno Español ha de aportar para el caso de estudio considerando subsidio a la adquisición de FCEV. (a) Subsidio anual en ($\text{€}/\text{año}$) en cada periodo de tiempo t (b) Subsidio acumulado durante el periodo de estudio (€)

- Al final del periodo de estudio, se cumple de forma aproximada, que del subsidio total aportado por el Gobierno Español, el 40 % se corresponde con el subsidio relacionado con la amortización de las infraestructuras de repostaje que incluyen el hidrógeno como combustible alternativo, el 35 % se corresponde con el subsidio relacionado con la adquisición de FCEV y el 25 % restante se corresponde con el subsidio a la venta de kilogramos de hidrógeno.

Figura 5.19: Subsidios que el Gobierno Español ha de aportar para el caso Español considerando subsidios a la adquisición de FCEV. (a) Subsidio anual en ($\text{€}/\text{año}$) en cada periodo de tiempo t (b) Subsidio acumulado durante el periodo de estudio (€)

Las conclusiones que se pueden obtener del análisis de la figura 5.19, correspondientes con el caso Español considerando subsidio a la venta de FCEV, son las mismas que las de la figura 5.18, que se corresponde con el caso de estudio considerando subvención a la venta de FCEV, al obtenerse los resultados del caso Español a partir de proyecciones de los datos del caso de estudio.

5.13. Beneficios económicos menores emisiones CO_2

La introducción del hidrógeno como combustible alternativo supone una serie de beneficios ambientales y sociales, relacionados fundamentalmente con la reducción de emisión de gases efecto invernadero en general y de CO_2 en particular, los cuales pueden ser cuantificados desde el punto de vista económico.

El coste asociado a las emisiones de CO_2 se puede desglosar en coste ambiental (los €/t CO_2 emitidos a la atmósfera y que es regulado por el mercado de derechos de emisión) y en coste social (los €/t CO_2 emitidos a la atmósfera que inciden directamente en problemas de salud de los habitantes de las diferentes ciudades).

En la presente tesis doctoral, los costes asociados a las emisiones de CO_2 , al igual que los datos considerados en el modelo, son dinámicos, es decir, varían para cada periodo de tiempo t , siendo estos datos obtenidos de diferentes estudios prospectivos entre los que destaca Un modelo energético sostenible para España en 2050.^{elaborado por Deloitte en Marzo de 2016}. Los datos del coste unitario en €/t CO_2 para la vertiente ambiental y para la vertiente social se pueden observar en la figura 5.20.

Figura 5.20: Previsión del coste asociado a las emisiones de CO_2 en €/t CO_2 en cada periodo de tiempo t (a) Coste ambiental (b) Coste social

Tomando estos datos de coste ambiental y coste social de las emisiones de CO_2 reflejados en la figura 5.20 y conociendo la cantidad de emisiones que se ahorran como consecuencia de la introducción del hidrógeno como combustible alternativo, es posible determinar el impacto económico en términos de ahorros, que implicaría el uso del hidrógeno como combustible alternativo. En las gráficas 5.21, 5.22, 5.23 y 5.24, se muestran los ahorros anuales en cada periodo de tiempo t y los ahorros acumulados a medida que avanza el tiempo, para el caso de estudio sin considerar subsidios a los FCEV, para el caso de España sin considerar subsidios a los FCEV, para el caso de estudio considerando los subsidios a los FCEV y para el caso de España considerando los subsidios a los FCEV respectivamente.

Figura 5.21: Ahorro asociado a la reducción de emisiones de CO_2 en €/t CO_2 motivado por el uso de hidrógeno como combustible alternativo para el caso de estudio sin considerar subsidio a los FCEV (a) En cada periodo de tiempo t (b) Acumulado en el periodo de estudio.

Figura 5.22: Ahorro asociado a la reducción de emisiones de CO_2 en €/t CO_2 motivado por el uso de hidrógeno como combustible alternativo para el caso de España sin considerar subsidio a los FCEV (a) En cada periodo de tiempo t (b) Acumulado en el periodo de estudio.

Del análisis de las figuras anteriores, se puede observar que la mayor parte de los ahorros motivados por la reducción de emisiones de CO_2 están relacionados con aspectos medioambientales, los cuales están regulados por el mercado de derecho de emisiones de CO_2 , en el cual están implicados todos los países, con el objeto de mitigar los efectos del calentamiento global. De la misma forma, el ahorro es mayor a medida que aumentan los periodos de tiempo t motivado por la mayor cantidad de t de CO_2 evitadas y por el mayor valor que tiene la t de CO_2 a medida que incrementan los periodos de tiempo t del estudio.

Como se puede observar, los ahorros en el caso de estudio y en el caso de España, son mayores cuando se considera subsidio a la adquisición de FCEV, pues esto incrementa el número de FCEV, el número total de kilómetros recorridos y por tanto, las emisiones de CO_2 .