



TRABAJO DE FIN DE GRADO

Vehículos y contaminación: una propuesta de tributación
Pigouviana

Vehicles and pollution: A suggested Pigouvian taxation.

Autor:

Tutor:

Grado en Análisis Económico

FACULTAD DE CIENCIAS EMPRESARIALES

UNIVERSIDAD PABLO DE OLAVIDE

Curso Académico: 2015 / 2016

Sevilla, 10 de Mayo de 2016

INDICE

Resumen.....	2
1. Introducción	2
2. Evidencia Empírica	4
2.1 Emisiones y combustión	4
2.2 Descripción de las series	10
2.3 Análisis de regresión.....	18
3. El modelo	21
3.1 Las familias usuarias de vehículos, las empresas y el gobierno.....	22
3.1.1 Las familias usuarias de vehículos.....	22
3.1.2 las empresas	24
3.1.3 El gobierno	24
3.2 Condiciones de primer orden.....	25
3.3 El equilibrio dinámico general competitivo	26
3.4 El planificador social y el impuesto Pigouviano	27
4. Cálculo del impuesto Pigouviano	30
5. Conclusiones.....	33
Bibliografía	34
Apéndices	35
Apéndice A: Matemático	35
Apéndice B: Fuentes de datos.....	38

Resumen

Este trabajo se centra en los contaminantes locales (CO y NOx) emitidos por los vehículos a motor. Usando un análisis de regresión, encontramos que los vehículos diesel, a pesar de incorporar tecnología para reducir estas emisiones, tienden a contaminar más que los vehículos de gasolina. En los 14 países europeos considerados, el parque de vehículos diésel se ha incrementado con el tiempo, un hecho denominado dieselización. La explicación se debe a dos motivos: la tributación ha sido más laxa para el caso del diesel que para la gasolina y, por otro lado, los vehículos diesel son más eficientes energéticamente (litros por km.). Encontramos una correlación positiva entre el crecimiento de las emisiones de CO, NOx y CO2 con ciertas variables relacionadas con la dieselización. Proponemos un modelo dinámico de equilibrio general teniendo en cuenta el uso de vehículos de motor y los efectos negativos de esta contaminación. A la luz de este modelo, concluimos que el impuesto sobre los combustibles ayudan a internalizar los costes de esta polución. El modelo propuesto puede ser adaptado para analizar el reciente escándalo de Volks Wagen.

Abstract

In this work, we focus on local pollutants (CO and NOx) emitted by motor vehicles. Using a regression analysis, we find that diesel vehicles, despite incorporating a technology to abate those emissions, tend to pollute more than gasoline vehicles. In fourteen European countries under consideration, the stock of diesel vehicles has increased over time, a fact known as dieselization. The explanation of this process is twofold: European tax policies have been lenient with diesel fuel and, secondly, diesel vehicles are more energy efficient (liters per km.) than gasoline counterparts. We find a positive correlation between the growth of CO, NOx and CO2 emissions and certain variables related with dieselization. We propose a dynamic general equilibrium model which takes into account the use of vehicles and the negative effects of these pollutants. Under the lens of the model, we conclude that the fuel tax can help internalize the costs of these pollutions. The model could be extended to understand the recent cheating scandal by Volks Wagen.

1. INTRODUCCION

En la sociedad existe una gran preocupación por los efectos nocivos que tienen los contaminantes en nuestra salud. Se han realizado numerosos estudios sobre el tema enfocándose desde distintas áreas del conocimiento sobre todo sanitario y económico.

Este trabajo se centra en los contaminantes locales emitidos por los vehículos de pasajeros, aquellos que afectan a la zona en la que se emiten. En particular analizaremos los óxidos de nitrógeno (NOx) y el monóxido de carbono (CO) y también haremos mención el dióxido de carbono (CO₂).

El motivo de estudio de estos gases se debe a la información extraída del reciente caso de fraude denominado en la prensa como el “escándalo Volkswagen”, donde la compañía falseaba las emisiones de NOx. Los vehículos diesel de la compañía emitían tantas emisiones que no cumplía con el reglamento europeo pero tenía un consumo energético menor. Desde el punto de vista social estas emisiones tienen costes para salud a cambio de que el conductor de diesel gaste menos en combustible.

Además al poco de conocerse el “escándalo Volkswagen” en la ciudad de Madrid se restringía el uso de vehículos debido a la contaminación, en París se anunciaba que iban a estar prohibido el uso de vehículos diesel por la zona céntrica de la ciudad. Esto nos dio a pensar que los vehículos diesel tenían un efecto medioambiental a nivel local más nocivo que sus homólogos de gasolina, pero se ha querido ocultar al gran público por parte de la industria automovilística.

Comprobamos que existen distintos focos de emisión de estos gases pero por encima de todos destacan dos, las factorías y los vehículos. En este trabajo nos vamos a centrar en el segundo foco de emisión. Presentaremos los costes que estos contaminantes locales tienen para 14 países europeos.

Observando trabajos anteriores como el de la Agencia de protección medioambiental de los Estados Unidos (2011) o el de Rodríguez-López J. y otros (2015) vemos que existen diferencias en las emisiones de CO₂ entre vehículos gasolina y diesel. Por ello en este trabajo nos preguntamos si ocurre lo mismo en las emisiones locales. Extrayendo información de los estudios de la compañía Volkswagen (nº 230) llegamos a la conclusión de que el diesel debe emitir más contaminantes que los vehículos de gasolina. Realizamos varios análisis de regresiones en 14 países Europeos entre los años 1991 y 2006 donde la variable a estudiar son el crecimiento de las de emisiones de CO, CO₂ y NOx, y veremos que hay una relación directa entre el crecimiento de las emisiones y el crecimiento los vehículos diesel.

Mirando con detenimiento los datos vemos que ha crecido el uso y la compra de vehículos diesel en Europa. Los motivos de este crecimiento se deben en primer lugar a que los vehículos diesel son más eficientes, consumen menos combustible por kilómetro y segundo a una política a nivel europeo que ha incentivado el uso de vehículos diesel.

Con el objeto de ver si esta política ha sido eficiente hemos usado un modelo dinámico de equilibrio general que incorpora varios aspectos relacionados con la tenencia y el uso de vehículos. El modelo es una versión de modelo de Rodríguez-López J., Marrero G.A., González-Marrero R.M, D (2015) quienes

utilizan el mismo marco teórico para analizar las emisiones de CO₂ como un gas de efecto invernadero. En este trabajo adaptamos este marco teórico a las emisiones locales, CO y NO_x. Con este modelo conseguimos endogeneizar dos tipos de decisiones, los kilómetros que realizan y la compra de vehículos nuevos. El modelo permite modelizar las emisiones de estos contaminantes locales.

Haciendo uso de este marco teórico podemos calcular cual es la asignación socialmente óptima, aquella que tiene en cuenta los costes sociales de esta externalidad.

Comparando las decisiones del equilibrio competitivo con las decisiones centralizadas en un planificador social hemos deducido que el impuesto sobre el combustible debe internalizar los costes asociados con las emisiones locales y no el impuesto de matriculación. En la medida que el motor diesel tiene una mayor carga emisiones por cada litro, debería estar más grabado que la gasolina.

Utilizando datos agregados, para internalizar el coste del CO y NO_x, concluimos que de media el impuesto por cada litro de diesel en España debería ser de entre 2,1 y 3,2 céntimos de euro. Hay que tener en cuenta que éste sería el impuesto que internaliza los costes de los contaminantes locales, si bien hay otras externalidades como las congestión, los accidentes de tráfico y la dependencia asociada al petróleo (Parry y otros (2007)). Para el caso del CO₂ Rodríguez-López J. y otros (2015) han calculado que el tipo impositivo es de 1.2 céntimos de euro por litro de gasolina, y 1.4 céntimos de euro por litro de diesel.

En la siguiente sección, se presentan evidencias empíricas que relacionan combustible y las emisiones. Además se añade un análisis de regresión. En la sección tercera presentamos un modelo dinámico de equilibrio general. Determinamos tanto el equilibrio competitivo como el del planificador social, lo cual permite el cálculo de la imposición Pigouviana, cuyo cálculo se realiza en la sección cuarta. Finalmente la última sección recoge y resume nuestras conclusiones.

2. EVIDENCIA EMPIRICA

2.1 Emisiones y Combustión

En esta sección se explica de qué dependen las emisiones locales de los vehículos. Los vehículos a motor producen gases nocivos para la salud durante el proceso de combustión. Las emisiones de gases nocivos dependen en gran medida del tipo de combustible que utilizan los vehículos. Los vehículos de gasolina realizan una combustión homogénea. Una combustión es homogénea cuando se mezcla aire con gasolina, se prende una chispa y se quema la gasolina de forma ordenada, por ello es más fácil que en un motor de gasolina

se dé una combustión completa. Se dice que una combustión es completa cuando la masa de aire real empleada coincide con la teórica, es decir, se produce una reacción con suficiente oxígeno y gasolina. La combustión completa sólo producirá CO₂ y agua. Sin embargo en el motor diesel, la mezcla se autoinflama al generarse unas condiciones determinadas de presión y temperatura, esto produce una combustión heterogénea. Por este motivo en los motores diesel no suele darse una combustión completa generando además de CO₂ y agua otros componentes casi inexistentes en las emisiones de los motores de gasolina que, por desgracia, suelen ser nocivos para la salud tal y como se recoge la OMS (2005). Estos componentes son:

- Monóxido de carbono, CO. Es un gas inodoro, incoloro y altamente tóxico. Puede causar la muerte cuando se respira a niveles elevados. El CO sustituye al oxígeno en la hemoglobina de la sangre produciendo carboxihemoglobina. Como la sangre no transporta oxígeno, éste no llega a los tejidos y los daña. Los grupos más vulnerables son las mujeres embarazadas, los fetos, los niños. Incluso si éste se encuentra en pequeñas cantidades, afecta a los individuos sanos produciendo dolor de cabeza y sensación de cansancio.

- Monóxido y dióxido de Nitrógeno, NO y NO₂ respectivamente. Cuando se produce la combustión en un motor, se produce más NO y parcialmente NO₂, siendo este último el más nocivo, pero el NO se puede transformar en NO₂ cuando éste se mezcla con el oxígeno de la atmósfera. El NO₂ puede provocar irritaciones respiratorias y oculares, además de acarrear enfermedades pulmonares si la exposición es prolongada. Por lo tanto los niños, ancianos y personas con problemas respiratorio son los más vulnerables a sus efectos. A lo largo del trabajo hablaremos de NO_x para referirnos a los dos tipos.

- Dióxido de Carbono, CO₂. Es un gas que no es tóxico en dosis bajas pero a partir de un cierto umbral y una prolongada exposición puede producir daños en el sistema nervioso central. Los efectos que tiene el CO₂, y la importancia del mismo en la sociedad actual se debe al impacto de este gas en el medio ambiente. El dióxido de carbono afecta al cambio climático, aumentando la temperatura media del planeta afectando a ecosistemas, a los niveles de agua de los océanos, al deshielo de los polos etc. Por ello es un problema que afecta de forma directa a todas las personas de mundo.

Tanto el Monóxido de carbono, CO, como el Monóxido y dióxidos de Nitrógeno, NO y NO₂ respectivamente, tienen una persistencia en el aire reducida, por lo que los efectos nocivos de estos se efectúan a nivel local. Mientras que los efectos que produce el Dióxido de Carbono tiene una persistencia en la atmósfera alta, afectando sus emisiones a niveles supranacionales.

Como ya hemos comentado, las emisiones principales de un motor de gasolina son, CO₂, N₂, H₂O, NO_x, CO y HC (hidrocarburos) estos tres últimos en muy pequeñas proporciones, en cambio en un motor diesel se emite más emisiones de NO_x, CO y HC.

Para disminuir las emisiones de gases nocivos, el sector automovilístico ha creado una serie de tecnologías explicadas en el manual de Bauer H. y otros (1995) que hacen que se reduzcan de forma significativas estos gases antes de salir por el tubo de escape. Entre estas destacan la incorporación de catalizadores y de la sonda lambda.

El catalizador permite corregir las emisiones de los vehículos producidos por el motor. Se emplea tanto en motores de gasolina como recientemente en motores diesel. Consiste en una malla metálica revestida de materiales nobles como el platino, rodio y paladio situado antes del silenciador del escape. Los hidrocarburos (HC) y el monóxido de carbono (CO) antes de ser expulsados por el escape son convertidos por el catalizador en dióxido de carbono (CO₂) y agua (H₂O). Los óxidos de nitrógeno (NO_x) son disociados en nitrógeno molecular (N₂) y oxígeno (O₂). Para que estas disociaciones se produzcan el catalizador debe estar a 500 C°. Los gases producidos no son perjudiciales directamente para las personas, el N₂ es un gas que respiramos constantemente, conforma el 78% del aire que respiramos y es inocuo. El vapor de agua (H₂O) lo mismo, y el CO₂ ya hemos explicado los efectos que produce.

Además antes de pasar por el catalizador la reacción que se produce en el motor de combustión del vehículo está modificada y controlada por otra importante innovación, la sonda lambda.

El factor lambda, λ , designa la proporción de aire por litro de combustible que entra al cilindro de un motor de combustión interna, comparada con la proporción estequiométrica o de la mezcla ideal, es decir aquella necesaria para que se dé una combustión completa, que es exactamente 14.7 partes de aire por cada parte de combustible.

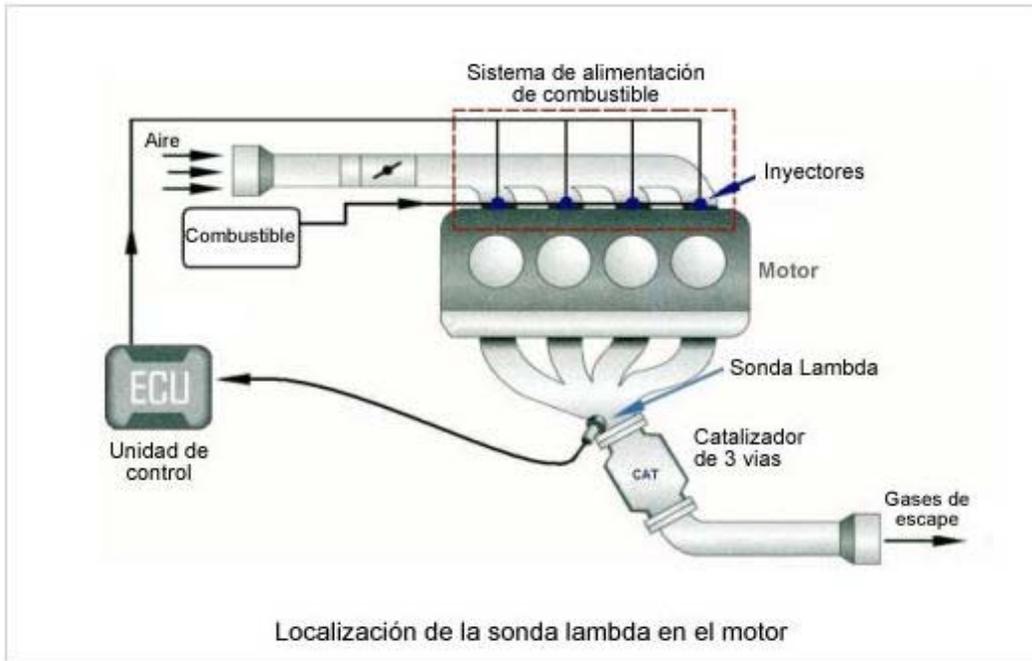
$$\lambda = \frac{\text{Mezcla aire producido}}{\text{Mezcla de teórico}} \quad (2.1)$$

Se dice que una combustión es de mezcla pobre cuando λ es mayor que uno, ya que hay más aire que el necesario estequiométricamente. Por el contrario, una combustión es de mezcla rica, cuando λ es menor que uno.

Para comprender mejor como funciona cualquier vehículo, en la Figura 2.1 vemos los tres componentes más importantes en la emisión de gases nocivos. Primero el motor, que produce una cantidad de CO, NO_x y CO₂. La sonda lambda da información al motor mediante un microprocesador de cuánto oxígeno y combustible se debe inyectar al motor para que, después de pasar por el catalizador, las emisiones se encuentren dentro de lo que se denomina ventana lambda. En la Figura 2.2 vemos en sombreado lo que se denomina ventana lambda, es un pequeño intervalo donde la proporción de mezcla de combustible y aire hace que la combustión emita las menores cantidades de gases nocivos. Cuando la cantidad de aire que llega al motor es 14.7 partes por

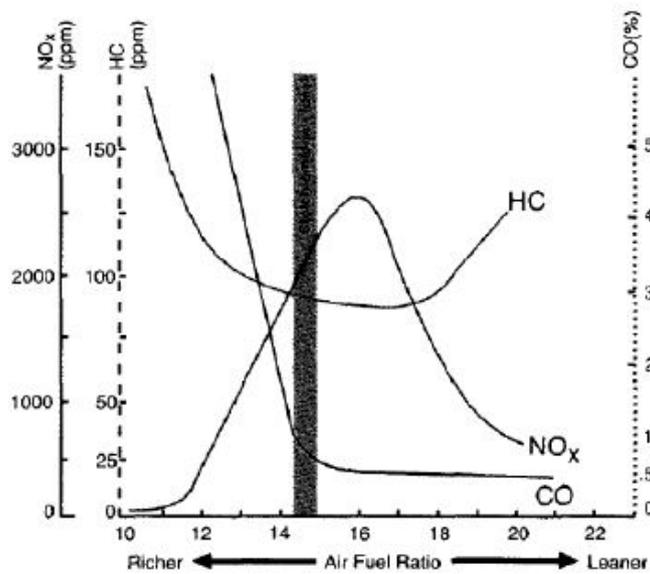
cada una de gasolina el valor lambda es exactamente igual a uno. Entonces se está dando una combustión completa, y por tanto tan solo se emite CO₂ y agua.

Figura 2.1: Tecnología incluida en los vehículos de gasolina



Fuente: <http://www.aficionadosalamecanica.net/sonda-lambda.htm>

Figura 2.2: Ventana Lambda



Fuente: Cando, C.J.C., (2013). "Investigation of knock limits of dual fuel engines" Department of energy, Budapest University of Technology and Economics.

Como explica el dossier de Volkswagen (número 230) y Payri (2011), en los vehículos diesel y en los de gasolina, debido a que tienen distinta capacidad de generar combustiones completas, usan distintos tipos de catalizadores y se les ajustan de forma distinta la sonda lambda. En el caso de la gasolina usando un catalizador de tres vías que junto a un correcto ajuste de la sonda lambda logra combustión completa.

En cambio en los motores diesel es imposible conseguir una combustión completa, sólo se puede reducir las emisiones que produce el motor. Para ello se usa dos tipos de catalizadores, el de oxidación y el de reducción. El catalizador de oxidación sirve de activo frente al CO y al HC. Para que funcione correctamente en el motor se tiene que dar una combustión pobre. El catalizador de reducción que sirve de activo frente al NOx. Para que funcione correctamente no puede haber presencia de oxígeno en los gases de entrada, cosa que sucede en un motor diesel después de pasar por el catalizador de oxidación.

Además de estas dos tecnologías, los vehículos diesel disponen adsorbedores de NOx que reducen la cantidad emitida cuando la mezcla es pobre y la eliminan por completo cuando la mezcla es rica, si bien su capacidad de almacenamiento es limitada y depende de la temperatura del motor.

En la tabla 2.1 podemos ver cómo la tecnología ha reducido las emisiones locales. Como podemos comprobar pero la incidencia de esta es mayor en los vehículos de gasolina.

Tabla 2.1: Emisiones por cada litro de combustible de vehículos que siguen el reglamento Euro VI

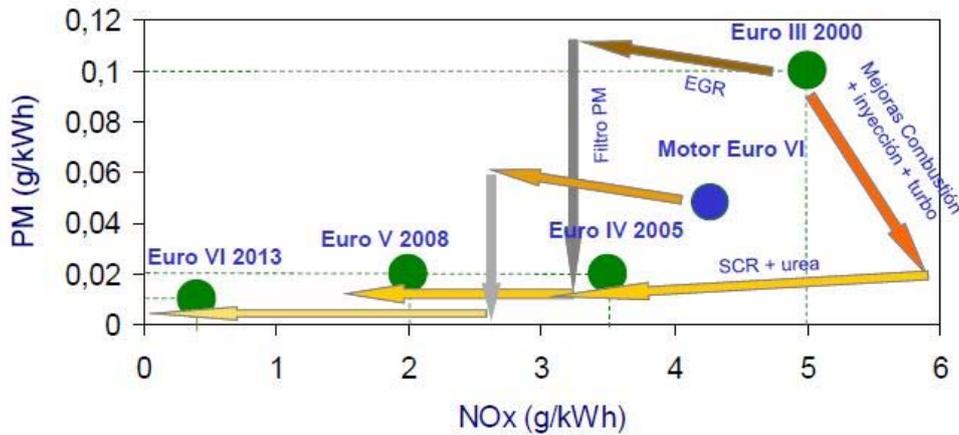
	Diesel		Gasolina	
	Pretratamiento	Postratamiento	Pretratamiento	Postratamiento
NOx	8-12g	1.5 g	6-9g	0.3g
CO	5-6g	4.5g	4-5g	2g
CO2	2689g	2689g	2348g	2348g
Partículas	1-3g	0.03g	1-3g	0.03g
HC	1.5-2g	0.5 g	4-5g	0.5 g

Fuente: Normativa Euro VI y Laurell M., (2014)

Las normativas tanto europea como estadounidense han priorizado la reducción de las emisiones de CO y NOx en la medida de lo posible usando la tecnología comentada. En la figura 2.3 podemos ver cómo ha ido evolucionando la regulación en las emisiones máximas de NOx y de PM (partículas) para vehículos diesel desde el año 2000 en adelante. Gracias a estos avances, la normativa europea ha podido exigir a las compañías automovilísticas que se reduzcan las emisiones de estos gases. Podemos ver

este reglamento en el inventario nacional de emisiones a la atmosfera, capítulo 7, transporte por carretera.

Figura 2.3: En el eje de abscisas, los niveles máximos de NOx según las distintas normas.



Fuente: Tema 4, Técnicas de reducción de emisiones, UPM.

El desarrollo e incorporación de la tecnología involucrada en la reducción de emisiones tiene costes para la industria automovilística. Por ello adaptarse a las normativas de emisiones, como es el caso de Euro VI en Europa, hace que las compañías aumenten los precios de los vehículos para poder cumplirlas, en especial en los vehículos diesel debido a sus características particulares.

Un ejemplo de esto es el “caso Volkswagen”. La compañía para abaratar costes, en vez de incorporar la tecnología que hacía cumplir con la normativa Euro VI para sus vehículos diesel, programaba el procesador de la sonda lambda (en la Figura 2.1, “unidad de control”) en los test de emisiones europeos para que emitiese menor cantidad de gases, en especial reducía los niveles de NOx. Esto provocaba que los litros de diesel usados por cada kilómetro recorrido aumentasen, pero en ese momento no se estaba midiendo ese factor. Después el mismo procesador se reprogramaba de forma que volviese a una situación en la que el vehículo consumiera menos cantidad de diesel y emitiese tantos gases nocivos aunque no cumplía la normativa Euro VI.

Aún con todos estos mecanismos de reducción, los vehículos siguen emitiendo gases nocivos y tienen efectos en la salud humana. Chay y Greenstone (2003) relacionan el total de partículas suspendidas en el aire debido a la contaminación, con la tasa de mortalidad infantil y estiman que una reducción de un 1% en el total de las partículas, supone una reducción en la mortalidad infantil de un 0.35%. Parry y Small (2005) estiman que el coste en la salud de las emisiones locales de los vehículos oscila entre 0,25 y 3,35 céntimos de dólar el kilómetro para automóviles del año 2000.

En el trabajo de Parry y otros (2015) se propone una tasación de los efectos de las emisiones locales. Usando datos de la OCDE estimaron que en promedio el valor de una vida salvada era de 3 millones de dólares del año 2005. Desagregaron por países la incidencia tenían las emisiones locales producidas por los vehículos en el total de tasa de mortalidad. Dentro de las emisiones locales desechan las emisiones de CO porque consideran que no tiene relevancia significativa en el conjunto de gases que afectan al medio ambiente. Sin embargo en el Anexo 4.2 del trabajo de Parry y otros (2015) realizan una tabla con los costes por toneladas emitidas de NOx. Dentro de esa tabla usaremos los datos que el trabajo denomina “emisiones a nivel de suelo” que son los correspondientes a las emisiones de los vehículos. Usando el del trabajo de Parry y otros (2015), en la tabla Tabla 2.1 resumimos los costes por tonelada de NOx emitido (euros del 2006) para los países de la Unión Europea.

Tabla 2.1: Coste de las Emisiones de NOx del Año 2010

	Coste/Tn	Tn Nox	Coste/PIB
Austria	2009.48	129919	0.102%
Bélgica	1660.23	123930	0.067%
Dinamarca	963.25	66993	0.036%
Finlandia	1657.97	53273	0.057%
Francia	2443.21	725667	0.102%
Alemania	3103.98	613330	0.080%
Grecia	1249.89	103070	0.049%
Irlanda	77.69	49430	0.003%
Italia	2069.82	472527	0.061%
Holanda	2053.98	122989	0.046%
Portugal	994.18	96614	0.045%
España	2939.54	487815	0.128%
Suecia	2514.11	79112	0.070%
Reino Unido	1899.35	515003	0.057%
Media	1831	259977	0.064%

Fuentes: OCDE y Parry y otros (2015)

De media en los países de la Unión Europea se estima que el coste es de 1831 euros por tonelada, un 0.064% del PIB de estos países. En países como Austria, Francia, Alemania o España el coste de los NOx llegan sobrepasar el 0.1% de media.

2.2 Descripción de las series

Analizamos las series correspondientes a la evolución del parque de vehículos en Europa, al consumo de combustible y a la emisión de gases de efecto invernadero y de gases contaminantes (CO y NOx). Las fuentes de datos usadas en esta sección están descritas en el Apéndice B al final de este

trabajo. Con fines ilustrativos, tomaremos como referencia las series de datos de Alemania y España, como ejemplos distintos en lo que a composición de la flota de vehículos se refiere dentro de Europa.

En el Gráfico 2.1 podemos observar la evolución del stock de vehículos de carretera. Observamos que tanto en España como en Alemania se ha incrementado el número de vehículos diesel frente a los de gasolina, pero en España este proceso ha sido más intenso. Tanto es así que en el año 2011 en las carreteras españolas había un 21% más de coches diesel que de gasolina, en cambio en Alemania había un 63% menos de coches diesel que de gasolina. Este proceso paulatino de reemplazo hacia un parque móvil con mayor número de vehículos diesel se le denomina dieselización, y España es uno de los países de la Unión Europea donde este proceso ha sido más fuerte. La dieselización del parque de vehículos de turismo es una característica común a todos los países europeos, no sólo de España tal y como podemos comprobar en la Tabla 2.2. En todos los países excepto en Grecia, ha aumentado el ratio de vehículos diesel frente a los de gasolina.

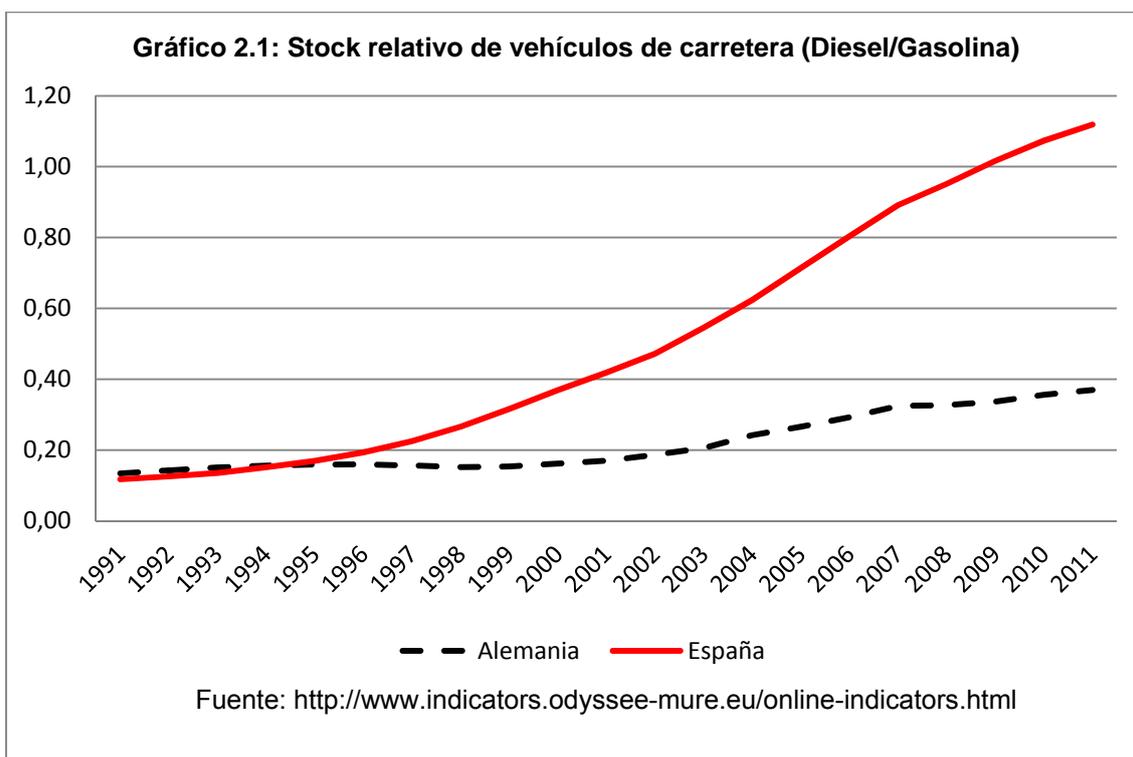
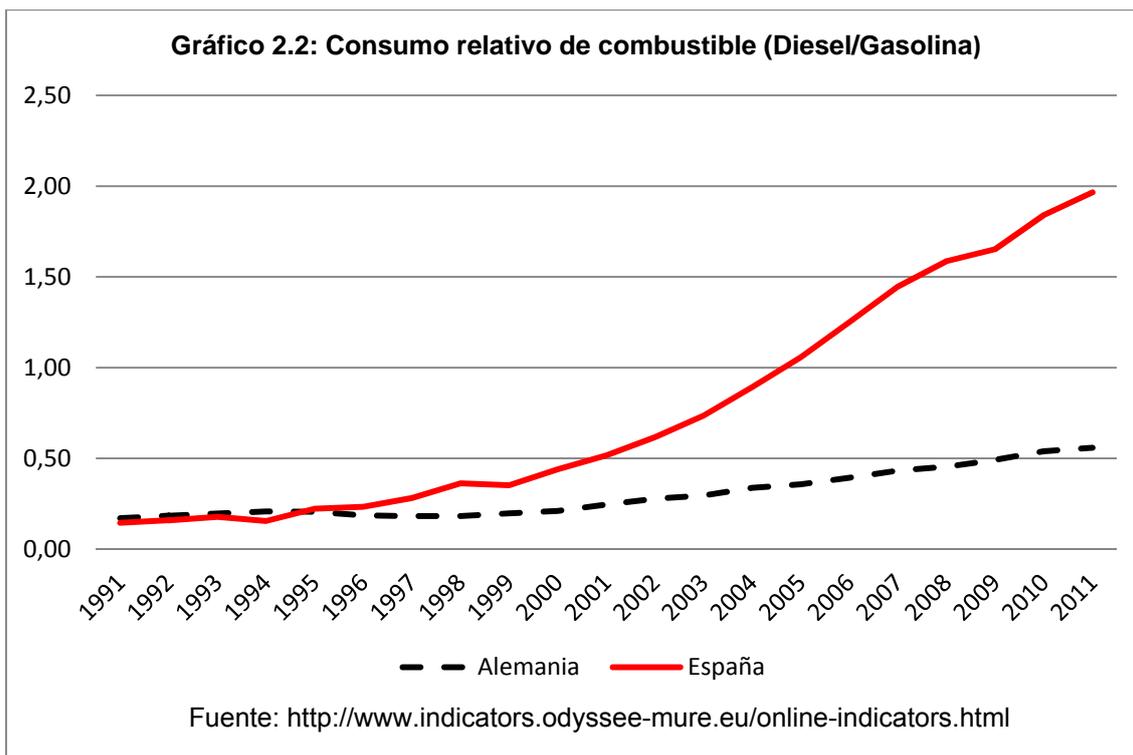


Tabla 2.2: Consumo de combustible y Stock de vehículos

	Consumo relativo (diesel/gasolina)			Stock relativo (diesel/gasolina)		
	1991	2011	Incremento	1991	2011	Incremento
Austria	0.214	1.423	1.209	0.182	1.259	1.076
Bélgica	---	---	---	0.395	1.666	1.272
Dinamarca	0.164	0.622	0.458	0.057	0.374	0.317
Finlandia	0.153	0.651	0.498	0.087	0.264	0.177
Francia	0.307	2.339	2.032	0.205	1.434	1.229
Alemania	0.170	0.559	0.388	0.134	0.369	0.236
Grecia	0.044	0.048	0.004	0.019	0.012	-0.007
Irlanda	0.183	0.653	0.470	0.120	0.425	0.305
Italia	0.323	1.110	0.787	0.148	0.718	0.570
Holanda	0.277	0.424	0.147	0.143	0.211	0.068
Portugal	0.159	2.016	1.857	0.098	0.869	0.771
España	0.145	1.966	1.822	0.117	1.119	1.001
Suecia	0.030	0.321	0.291	0.028	0.228	0.200
Reino Unido	0.146	0.544	0.398	0.039	0.448	0.410
Uds.	Tn. Diesel / Tn. Gasolina			Veh. Diesel / Veh. Gasolina		

Fuente: <http://www.indicators.odyssee-mure.eu/online-indicators.html>

Esto concuerda con el Gráfico 2.2, donde podemos ver el consumo de diesel frente a la gasolina. En ambos países ha crecido el consumo de diesel frente a la gasolina conforme el parque de vehículos se ha dieselizado. Pero en España, al igual que ocurría con el stock de vehículos y como consecuencia directa de ello, se consume más diesel que en Alemania en términos relativos. Este aumento del consumo de diesel frente a la gasolina en los últimos años ha sido habitual en todos los países de la Unión Europea, tal y como se puede observar en la Tabla 2.2. El consumo de diesel en el año 2011 en España era un 96,62% mayor que de gasolina, aunque su parque móvil de diesel era tan sólo un 11,88% mayor. Lo mismo ocurre con otros países de la Unión Europea estudiados. Esto nos lleva a pensar que los coches diesel se usan más que los coches de gasolina.



En la Tabla 2.3 podemos ver el ratio los kilómetros recorridos de vehículos diesel frente a los de gasolina en 7 países europeos. Tanto en España como en Alemania los vehículos diesel se usan de media un 48% y un 68% más respectivamente en los periodos estudiados. Lo mismo ocurre en otros países de la Unión Europea. Además esa diferencia a lo largo del tiempo se ha incrementado en todos los países.

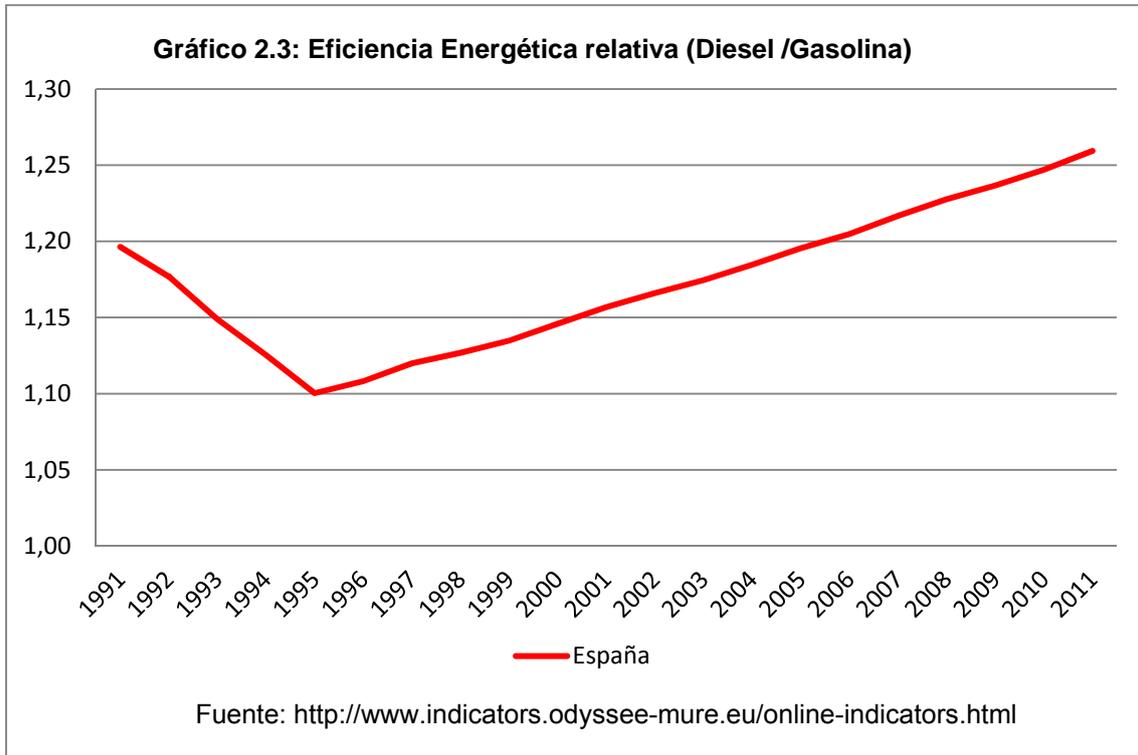
Tabla 2.3: Kilómetros relativos (Diesel/Gasolina) medios realizados por los vehículos: Media 3 años

	1991-1993	2009-2011	Incremento
Austria	1.233	1.251	0.018
Dinamarca	1.489	1.652	0.163
Francia	1.764	1.817	0.053
Alemania	1.430	1.871	0.441
Holanda	2.158	2.202	0.044
Portugal	1.620	1.993	0.373
España	1.350	1.918	0.568
Uds.	Km diesel/Km Gasolina		

Fuente: <http://www.indicators.odyssee-mure.eu/online-indicators.html>

Observando el Gráfico 2.3 vemos el ratio de eficiencia entre los vehículos diesel frente a los de gasolina en el parque español, los vehículos diesel son

más eficientes que los de gasolina, Los vehículos diesel consumen menos litros por cada cien kilómetros, independientemente del periodo o país considerado.



Si miramos los datos del precio del combustible, vemos que los precios netos relativos del combustible diesel frente a la gasolina son aproximadamente los mismos pero si incluimos los impuestos el combustible diesel siempre es más barato en los todos periodos estudiados de cada país. En los últimos años, debido a la alta demanda de diesel por parte de los consumidores, las refinerías han aumentado el precio del diesel. Sin embargo cuando comparamos el precio final incluyendo los impuestos (IVA e Impuesto de Hidrocarburos), el precio por litro de gasolina es un 18,2% más caro de media en los periodos estudiados. En la tabla 2.4 vemos que esto generalizado en toda Europa.

Tabla 2.4: Precios del combustible 2013 (céntimos de Euro por litro de combustible)

	Precio Neto (sin impuestos)			Precio con impuestos		
	Diesel	Gasolina	Gas/Die	Diesel	Gasolina	Gas/Die
Austria	71	65.3	0.92	135.8	139.2	1.03
Bélgica	73.1	69.2	0.95	140.2	158	1.13
Dinamarca	78	74.9	0.96	148	167.5	1.13
Finlandia	77.1	70.5	0.91	152.4	164.1	1.08
Francia	69.1	67.3	0.97	135.1	153.7	1.14
Alemania	73.1	69	0.94	142.9	160	1.12
Grecia	78.9	69.3	0.88	139.3	169.3	1.22
Irlanda	73.2	68.4	0.93	151.5	158.9	1.05
Italia	75.1	71.4	0.95	165.9	174.9	1.05
Holanda	72.8	68.2	0.94	142.2	173.7	1.22
Portugal	76.1	69.8	0.92	138.8	157.9	1.14
España	75.5	72	0.95	136.1	143.3	1.05
Suecia	75.4	68.4	0.91	164.4	166.8	1.01
Reino Unido	69.8	63.6	0.91	165.7	164.1	0.99

Fuente: <http://ec.europa.eu/energy/en/statistics/weekly-oil-bulletin>

En conclusión, en todos los países se ha modificado la tributación de los combustibles favoreciendo al diesel frente a la gasolina provocando un efecto reemplazo, es decir se adquieren más vehículos diesel que de gasolina y un efecto rebote, se utiliza más los vehículos diesel que los de gasolina.

En lo que respecta a las emisiones el Gráfico 2.4 representa la cantidad emitida de CO₂ (toneladas por persona) desde 1991 hasta 2011 para Alemania y España, a modo de ejemplo. Mientras que en Alemania es el país donde más han descendido las emisiones de CO₂ per cápita, España es uno de los países donde más han aumentado de la Unión Europea. Como veremos a continuación en nuestro análisis de regresión, esto está relacionado con el hecho de las diferencias en la composición de vehículos en ambos países. La Agencia de Protección Medio Ambiental de Estados Unidos (EPA) en 2011 emitió un informe alertando de que, por cada litro, el diesel emitía un 14,5% más de CO₂ que la gasolina. En la medida que el diesel contiene una mayor carga de carbono por litro que la gasolina, la sustitución en la combustión de diesel por gasolina ha ido acompañada por un aumento en las emisiones de CO₂ per cápita. Este aumento es observable en la Tabla 2.5 donde los países más dieselizados tienen unos altos niveles de crecimiento del CO₂.

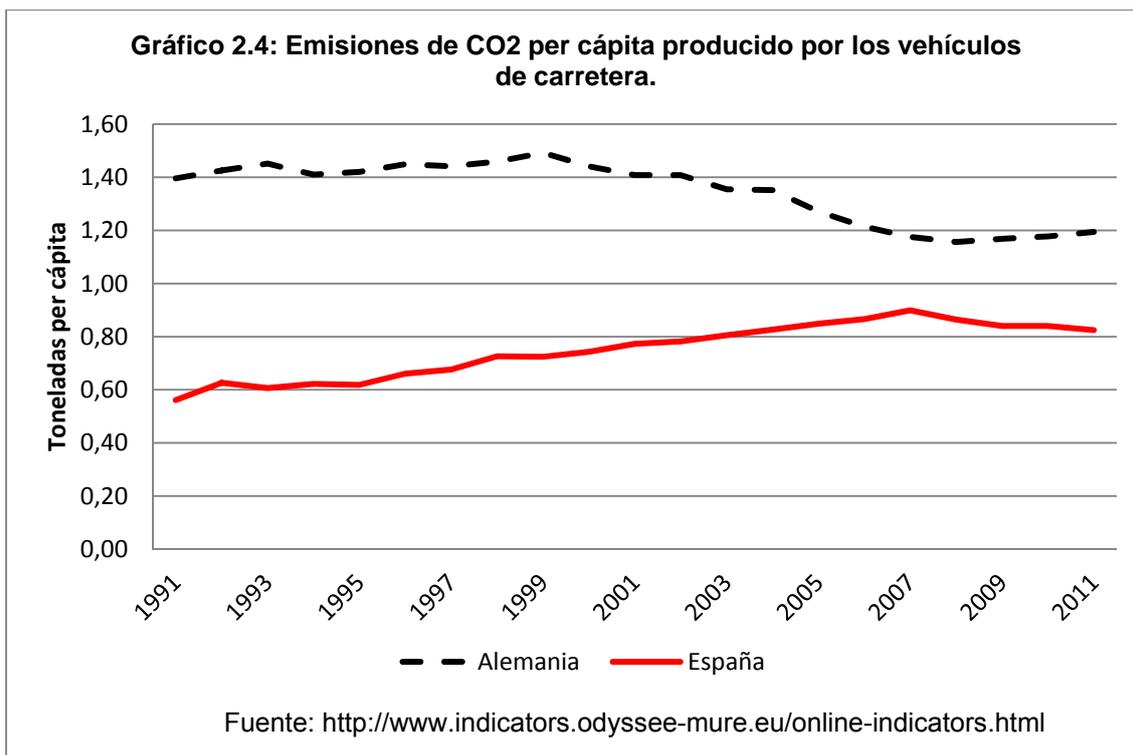
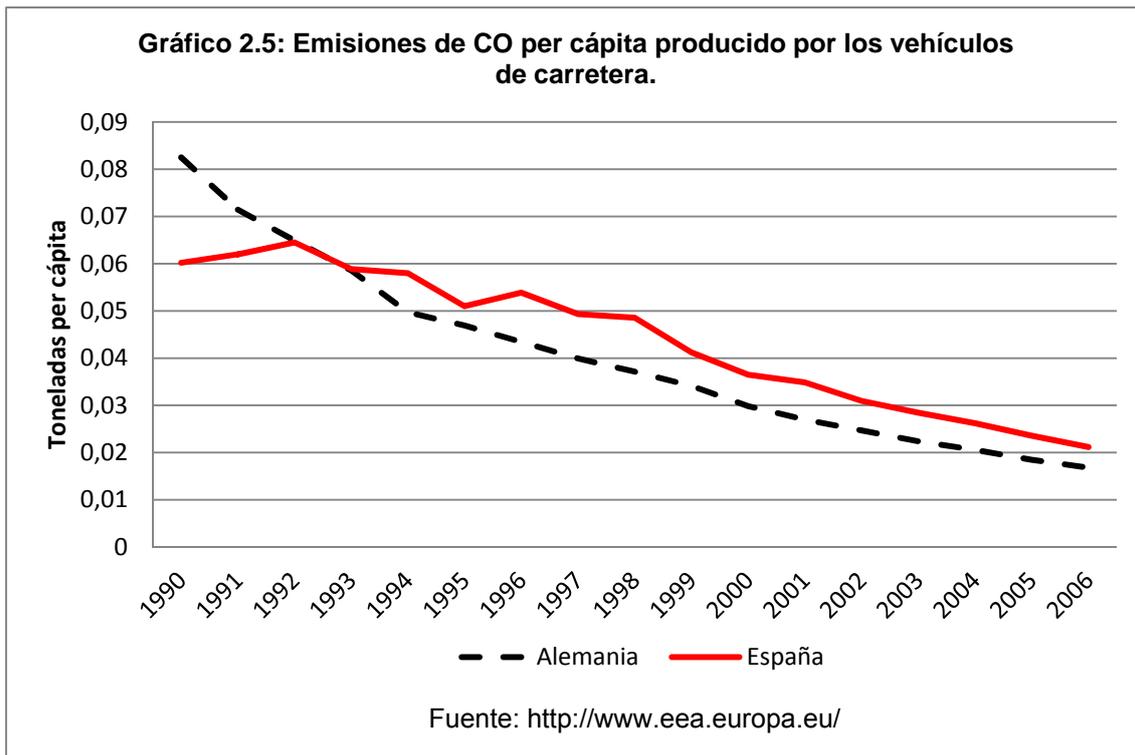


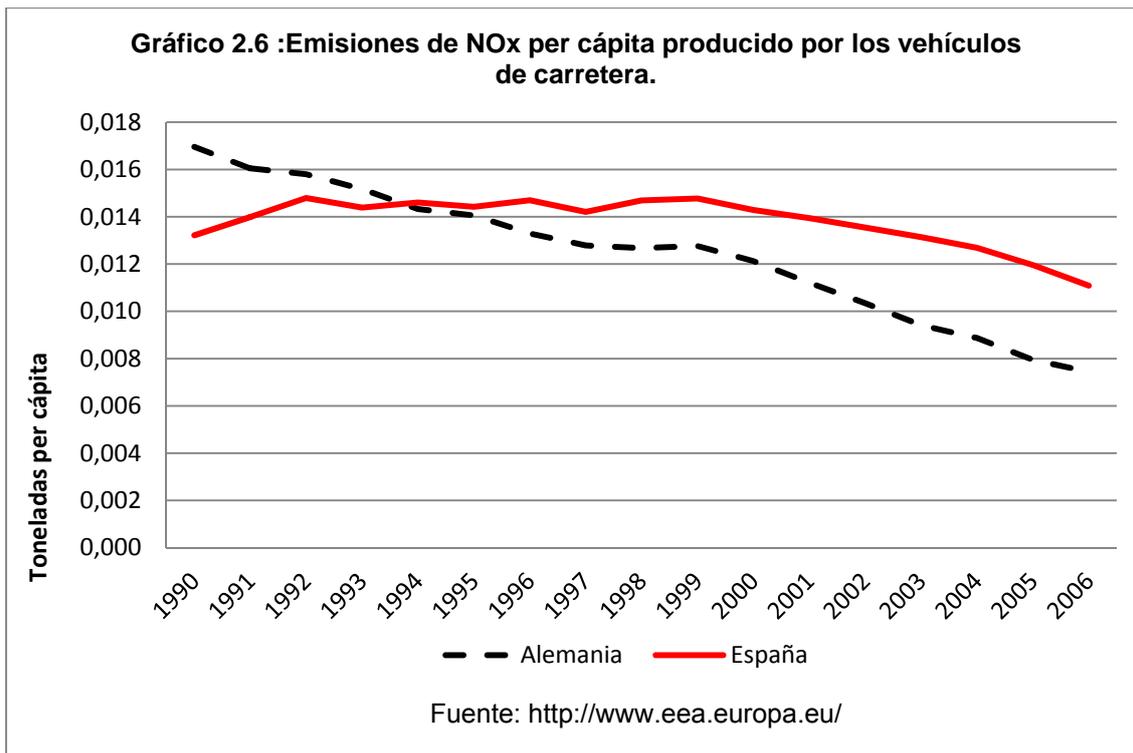
Tabla 2.5: Crecimiento acumulado de las Emisiones producidas por los vehículos de carretera

	CO 1990-2006	NOx 1990-2006	CO2 1990-2011
Austria	-66.0%	52.0%	29.1%
Bélgica	-66.7%	-32.7%	---
Dinamarca	-64.7%	-40.2%	20.3%
Finlandia	-49.1%	-68.1%	---
Francia	-81.8%	-40.6%	0.1%
Alemania	-79.6%	-56.1%	-14.4%
Grecia	-38.3%	-13.2%	35.9%
Irlanda	-68.3%	-10.8%	66.5%
Italia	-66.8%	-48.1%	-0.2%
Holanda	-65.1%	-53.3%	27.4%
Portugal	-54.9%	15.1%	101.1%
España	-64.8%	-16.1%	46.9%
Suecia	-69.2%	-57.2%	-14.6%
Reino Unido	-83.1%	-63.3%	-20.1%
Media	-65.6%	-30.9%	23.2%
Des. Est.	0.1217	0.3359	0.3632

Fuente: <http://www.eea.europa.eu/>

Los Gráfico 2.5 y 2.6 presentan la evolución del CO y el NOx producidos por los vehículos de carretera (toneladas por persona). En el primero de ellos se ve cómo los datos de CO descienden drásticamente desde 1990 hasta 2006 en ambos países. Las emisiones de NOx tienen un comportamiento parecido, descienden en ambos países entre 1990 y 2006 pero hay una diferencia sustancial entre ambos países. Mientras que en España se ha reducido un 16,12% en Alemania se ha reducido un 56,12%. Se debe a la dieselización del parque de vehículos español, tal y como veremos en el análisis de regresión posterior.





La reducción de las emisiones de CO y NOx está condicionada a la incorporación de los catalizadores y la sonda lambda en los vehículos. Sin embargo también podemos ver que tiene una mayor incidencia en el CO que en el NOx.

A la luz de la tabla 2.5 antes comentada que en todos los países europeos ha descendido los niveles de CO. Sin embargo en lo que se refiere a NOx los resultados han sido más dispares. En Austria y en Portugal no han descendido, además en el resto de países han descendido pero de forma muy desigual. Para comprobar esta disparidad hemos usado el dato de la desviación estándar del porcentaje de reducción de cada país. En los niveles de CO la desviación estándar es menor que en las emisiones de NOx. Esto nos indica que aunque las innovaciones tecnológicas comentadas han reducido los niveles de CO y NOx, en los países donde la dieselización ha sido más severa los niveles de NOx se han reducido menos que en los países donde no se ha dieselizado el parque móvil tan bruscamente.

2.3 Análisis de Regresión

Para comprobar la relación entre las emisiones de los tres gases considerados ($g = \text{CO}_2, \text{CO}$ y NO_x) con las variables propuestas, hemos realizado un análisis de regresión por mínimos cuadrados ordinarios (MCO) propuesto por Rodríguez-López J. y otros (2015) para el análisis de CO2 la estructura es la siguiente:

$$\Delta \ln(Emis_{n,t}^g) = constante + \gamma_0 t + \gamma_1 \ln(Emis_{n,t-1}^g) + \gamma_2 \Delta \ln(PIBpc_{n,t}) + \gamma_4 \Delta \ln(Stock_{n,t}) + \gamma_5 \Delta Z_{n,t} \quad (2.3)$$

Donde $\Delta \ln(Emis_{n,t}^g)$ es la tasa crecimiento de las emisiones del gas g producidas por vehículos de carretera en el país n en el año t , t es una tendencia lineal, $\ln(Emis_{n,t-1}^g)$ es un retardo de la variable explicativa; $\Delta \ln(PIBpc_{n,t})$ es la tasa de crecimiento del PIB per cápita del país n en el año t ; $\Delta \ln(Stock_{n,t})$ es la tasa de crecimiento del stock total de coches del país n en el año t .

La variable $Z_{n,t}$ está relacionada con la dieselización del parque de vehículos y puede adoptar tres especificaciones alternativas: (a) $Z_{n,t}$ indica el stock relativo de vehículos de carretera diesel frente a los de gasolina; (b) $Z_{n,t}$ es el ratio entre consumo de combustible diesel sobre la gasolina de los vehículos de carretera; y (c) $Z_{n,t}$ indica el ratio entre el precio del diesel frente al de gasolina, ambos incluyendo impuestos. Todas las especificaciones están diferenciadas.

La Tabla 2.6 presenta los resultados de las regresiones para las emisiones de CO2. Todas las variables son estadísticamente significativas.

Tabla 2.6. Variable dependiente: Emisiones de CO2 per cápita proveniente de los vehículos de motor (tasas de crecimiento), 1990-2011

	(a)	(b)	(c)
Constante	3.3943*** (-0.6744)	3.5767*** (0.6877)	3.3898** (1.3949)
Tendencia lineal	-0.0017*** (0.0003)	-0.0017*** (0.0003)	-0.0016** (0.0006)
Ln(emisión CO2 (-1) per cápita)	-0.0151* (.0079)	-0.0122 (0.0080)	-0.0016 (0.0111)
$\Delta \ln(\text{PIB per cápita})$	0.2361*** (0.0733)	0.2239*** (0.0732)	0.2198** (0.0919)
$\Delta \ln(\text{Stock total de vehículos})$	0.6861*** (0.0982)	0.6960*** (0.0982)	0.5890*** (0.1350)
$\Delta(\text{Diesel/Gasolina stock de vehículos})$	0.1823** (0.0716)		
$\Delta(\text{Diesel/Gasolina consumo de fuel})$		0.1063*** (0.0374)	
$\Delta(\text{Gasolina/Diesel precio de fuel, impuestos incluidos})$			0.0218 (0.0162)
No. Obs	258	258	165
R2	0.468	0.471	0.354
No. Países	13	13	13

El ciclo económico afecta al crecimiento de las emisiones debido a que aumenta el uso del parque de vehículos en periodos expansivos y así lo refleja

la relación positiva y significativa de la tasa crecimiento del PIB per cápita. El crecimiento del Stock de vehículos afecta positivamente a las emisiones.

Si miramos las variables relacionadas con la dieselización, (especificaciones de $Z_{n,t}$ en a, b y c) todas tienen una relación positiva si bien el precio no es estadísticamente significativo. Esto indica que estas prácticas de dieselización han aumentado las emisiones de CO₂, ratificando investigaciones como la de González R.M. y Marrero G.A. (2012) que sugieren que los coches diesel emiten más CO₂ que los coches de gasolina.

Tabla 2.7. Variable dependiente: Emisiones de NOx per cápita procedente de los vehículos de motor (tasas de crecimiento), 1990-2011

	(a)	(b)	(c)
Constante	14.2477*** (1.8897)	13.0961*** (2.0095)	6.9016 (4.9689)
Tendencia lineal	-0.0072*** (0.0009)	-0.0066*** (0.0010)	-0.0035 (0.0025)
Ln(emisión NOx(-1) per cápita)	-0.0588*** (0.0159)	-0.0544*** (0.0168)	-0.0212 (0.0285)
Δ Ln(PIB per cápita)	0.3730** (0.1809)	0.3091 (0.1925)	-0.7620** (0.3314)
Δ Ln(Stock total de vehículos)	0.2565 (0.1811)	0.2370 (0.1912)	0.5723** (0.2853)
Δ (Diesel/Gasolina stock de vehículos)	0.7087*** (0.1440)		
Δ (Diesel/Gasolina consumo de fuel)		0.2967*** (0.0924)	
Δ (Gasolina/Diesel precio de fuel, impuestos incluidos)			.00039 (0.1134)
No. Obs	223	207	112
R ²	0.282	0.242	0.085
No. Países	14	14	14

La Tabla 2.7 presenta los resultados para las emisiones de NOx. Destaca que hay una alta significatividad entre la tasa de crecimiento de las emisiones de NOx y las variables estudiadas. La variable de la tasa de crecimientos del Stock de coches totales, no tiene relación estadísticamente significativa con la variable dependiente. En cambio la tasa de crecimiento relativo del Stock de vehículos diesel/gasolina tiene una relación positiva y significativa, al igual que el consumo relativo diesel/gasolina. Esto ocurre en la tabla 2.7 para las ecuaciones a y b. Esto indica que las emisiones de NOx están relacionadas con el uso de vehículos diesel y no tanto con el aumento del número de vehículos totales. Se observa en la regresión que la mayor dotación de vehículos diesel produce mayores incrementos en las emisiones de NOx.

En la ecuación c, debemos comentar que hay muy pocos datos de precio y poca significatividad general en la ecuación (el R2 es muy bajo). Además las relaciones que la ecuación marca como significativas no tienen lógica económica. Es el caso de la relación entre la tasa de crecimiento del PIB cuya ecuación sugiere una relación negativa con la tasa de crecimiento de las emisiones de NOx; cosa que no ocurre en las ecuaciones a y b.

La Tabla 2.8 presenta los resultados de las regresiones para las emisiones de CO. Lo que podemos ver en esta regresión es que la tasa de crecimiento de las emisiones de CO producidas por los vehículos de carreteras solo depende del stock de coches y no del resto de variables. Esto nos hace pensar que las emisiones de CO no están tan relacionadas con el parque de vehículos como los otros dos gases estudiados. Dependen más de factores exógenos a nuestra regresión como innovaciones tecnológicas destacando los catalizadores.

Tabla 2.8. Variable dependiente: Emisiones de CO per cápita procedente de los vehículos de motor (tasas de crecimiento), 1990-2011

	(a)	(b)	(c)
Constante	8.2472*** (2.2405)	9.0508*** (2.1982)	10.4605* (5.4153)
Tendencia lineal	-0.0041*** (0.0011)	-0.0045*** (0.0011)	-0.0052* (0.0027)
Ln(emisión CO(-1) per cápita)	0.0012 (0.0111)	0.0021 (0.0107)	-0.0018 (0.0175)
Δ ln(PIB per cápita)	0.0015 (0.1885)	-0.0315 (0.1833)	-0.1868 (0.3618)
Δ ln(Stock total de vehículos)	0.4264*** (0.1646)	0.4819*** (0.1594)	0.1920 (0.3332)
Δ (Diesel/Gasolina stock de vehículos)	-0.1902 (0.1533)		
Δ (Diesel/Gasolina consumo de fuel)		-0.1302 (0.0897)	
Δ (Gasolina/Diesel precio de fuel, impuestos incluidos)			-0.0497 (0.1267)
No. Obs	223	207	112
R2	0.198	0.250	0.049
No. Países	14	14	14

3. EL MODELO

Vamos a desarrollar un modelo dinámico estocástico de equilibrio general en el que estudiaremos los efectos de las emisiones locales de CO y NOx en las decisiones de los agentes económicos. Con este modelo determinaremos el tipo impositivo óptimo que hace que el equilibrio competitivo llegue a una posición eficiente (desde el punto de vista de un planificador social hipotético).

Este modelo está basado en el trabajo de Rodríguez-López J. y otros (2015) en el que analizan las emisiones de CO2. A efecto de este modelo, una diferencia crucial entre el CO2 y las emisiones de CO y NOx es que el CO2 tiene una persistencia alta en la atmósfera, por lo que buena parte de las emisiones producidas en un periodo afectan a los siguientes en forma de efecto invernadero. Las emisiones de CO2 no afectan a la salud humana. Las emisiones de CO y NOx tienen una persistencia en la atmósfera de unos pocos días pero son nocivos para la salud humana (véase Van Loon y Duffy (2005) para el NOx y el SO2 y Weinstock (1969) para el CO).

A continuación vamos a diseñar un modelo para que las familias no sólo elijan consumo y horas trabajadas sino que también decidan los kilómetros recorridos con los vehículos y los vehículos que se compran en cada periodo.

3.1 Las familias usuarias de vehículos, las empresas y el gobierno

3.1.1 Las familias usuarias de coches

Asumimos que los consumidores representativos tienen una función de utilidad cóncava dependiente del consumo c_t , el servicio de los vehículos s_t y las horas que el individuo dedica trabajo h_t . El consumidor maximiza su función de utilidad según la siguiente forma:

$$\sum_{t=0}^{\infty} \beta^t \left(\ln(c_t) + \psi_s \frac{s_t^{1-\gamma} - 1}{1-\gamma} - \psi_h \frac{h^{1+\frac{1}{\nu}}}{1+\frac{1}{\nu}} \right). \quad (3.1)$$

En la ecuación (3.1), γ mide el grado de curvatura de la función de utilidad derivada del uso de los vehículos y ν es la elasticidad Frisch de la oferta de trabajo. El par de parámetros ($\psi_s > 0, \psi_h > 0$) señala la "preferencia" por conducir y la de trabajar respectivamente. Es decir si ese parámetro (ψ_s) es alto, entendemos que al individuo le encanta conducir. Mientras mayor sea (ψ_h), menor es la disposición al trabajo del individuo.

El servicio de coche se asume que depende del número de kilómetros conducido (m_t), y del stock de coches (q_t):

$$s_t = q_t m_t^\varphi, \quad (3.2)$$

donde $0 > \varphi > 1$ implica que el uso de coches da un servicio menor por cada kilómetro marginal conducido. Asumimos que la ley de acumulación de vehículos es geométrica siguiendo la forma:

$$q_{t+1} = (1 - \delta_q)q_t + x_t, \quad (3.3)$$

donde $0 < \delta_q < 1$ denota el ratio de depreciación de coches y que x_t representan las unidades de coches nuevos, que pueden ser comprados a un

precio $p_t^x(1 + \tau_t^x)$ donde τ_t^x es el impuesto indirecto por la adquisición del coche. Debemos tener en cuenta que aquí entra todo tipo de impuesto que se incluya en el momento de la compra del coche como por ejemplo el impuesto de matriculación.

Para simplificar la cantidad de tiempo total está normalizada a uno. Asumimos que el tiempo total se distribuye entre, ocio y horas de según la forma:

$$1 = l_t + h_t, \quad (3.4)$$

donde l_t es la fracción de tiempo dedicado al ocio.

Para este servicio, el coche necesita usar recursos que afecta al presupuesto de los consumidores. Asumimos que esas expectativas de gasto se dividen entre costes fijos y variables. Los costes variables están relacionados con el combustible, el mantenimiento y reparación del coche. El consumo de combustible es proporcional al número de kilómetros conducidos, $m_t q_t$. Sea $\omega_F > 0$ los litros de combustible por kilómetro que asumimos es constante. Mientras menor ω_F , mayor es la eficiencia energética del vehículo. El gasto total en gasolina F_t es:

$$F_t = (p_t^F + \tau_t^F)\omega_F m_t q_t, \quad (3.5)$$

donde p_t^F denota el precio neto de combustible, y τ_t^F representa el impuesto a la gasolina.

De similar manera, las reparaciones y el mantenimiento se asume que es proporcional a los kilómetros conducidos, por el parámetro $\omega_{MR} > 0$:

$$Z_t = p_t^{MR}\omega_{MR}m_t q_t, \quad (3.6)$$

donde p_t^{MR} denota el precio por unidad de mantenimiento y reparación. Por lo que la suma de los costes variables se conjuga con F_t y Z_t .

Denotamos o_t a los costes operativos (variables) por kilómetro:

$$o_t = (p_t^F + \tau_t^F)\omega_F + p_t^{MR}\omega_{MR} \quad (3.7)$$

Los costes operacionales son proporcionales a la distancia recorrida:

$$o_t m_t q_t = Z_t + F_t \quad (3.8)$$

Hay otros gastos que se consideran costes fijos como son el impuesto de matriculación, el coste del seguro etc. Estos gastos no dependen de su uso, solamente de su propiedad.

$$TI_t = p_t^{TI} q_t, \quad (3.9)$$

donde p_t^{TI} denota una agregación de precios de esos costes fijos.

El ahorro de los consumidores se da acumulando capital k_t , que se les alquila a las empresas para producir bienes, rindiendo R_t unidades de renta. Esos bienes son acumulados según la ley de acumulación del capital geométrica según la fórmula:

$$k_{t+1} = (1 - \delta_k)k_t + i_t, \quad (3.10)$$

donde i_t es la inversión en capital del consumidor.

Finalmente el presupuesto de los consumidores se puede escribir como

$$c_t + (1 + \tau_t^X)p_t^X x_t + i_t + F_t + Z_t + TI_t = W_t h_t + R_t k_t + TR_t \quad (3.11)$$

donde (W_t, R_t) representa el salario por hora y el precio del la renta del capital, y TR_t son transferencias netas del estado a los consumidores.

El problema de las familias viene dado por la maximización de la función de utilidad (3.1) sujeto a la ley de acumulación de vehículos (3.3), la ley de acumulación del capital (3.10) y la restricción presupuestaria (3.11). Las variables de control de este problema son el consumo c_t , la inversión i_t , la compra de vehículos nuevos x_t , el kilometraje de los vehículos m_t , y las horas trabajadas h_t . Las variables de estado son el fondo de capital k_{t+1} y el parque de vehículos q_{t+1} .

3.1.2 Las empresas

Vamos a considerar una empresa representativa maximizadora de beneficios en un contexto de competencia perfecta tanto en el mercado de bienes como en el mercado de factores. Las empresas producen un número de bienes Y_t , cuyos precios de mercados están normalizados a uno. Las empresas emplean capital y las horas de trabajo (K_t, H_t) .

$$Y_t = F(K_t, H_t) = A_t K_t^\theta H_t^{1-\theta} \quad (3.12)$$

Donde A_t es la productividad total de los factores, $0 < \theta < 1$ es la proporción de la renta total con la que se remunera el uso de capital en el sector de bienes finales.

El problema de maximización de beneficios se escribe de la siguiente forma:

$$\max_{(K_t, H_t)} [F(K_t, H_t) - W_t H_t - R_t K_t] \quad (3.13)$$

Dado precio de la remuneración laboral W_t y el precio de remuneración del capital R_t , la empresa demanda trabajo H_t y capital K_t hasta que maximizar beneficios.

3.1.3 El gobierno

Finalmente consideraremos al gobierno como una entidad recaudadora de los impuestos y que realiza transferencias de suma fija a los consumidores. Asumimos que el gobierno tiene su presupuesto estable periodo a periodo.

El gobierno recauda el impuesto al combustible τ_t^F y el impuesto a la venta de coches τ_t^X , por lo que la recaudación total es:

$$G_t = \tau_t^F \omega_F m_t q_t + \tau_t^X p_t^X x_t \quad (3.14)$$

El equilibrio presupuestario implica que esta recaudación tiene que ser igual las transferencias recibidas por las familias.

$$G_t = TR_t \quad (3.15)$$

Finalmente, dado unos precios exógenos $(p_t^X, p_t^{MR}, p_t^F, p_t^{TI})$, la restricción de factibilidad de nuestro modelo se expresa como:

$$C_t + I_t + p_t^X X_t + (p_t^F \omega_F + p_t^{MR} \omega_{MR}) M_t Q_t + p_t^{TI} Q_t = Y_t \quad (3.16)$$

3.2 Condiciones de primer orden.

Las condiciones de primer orden se pueden expresar del siguiente modo. En primer lugar una condición de primer orden dinámica que determina la decisión de inversión en capital k_t :

$$\frac{1}{c_t} = \beta E_t \left[\frac{1}{c_{t+1}} (1 - \delta_k + R_{t+1}) \right], \quad (3.17)$$

donde $(1 - \delta_k + R_{t+1})$ es el tipo de interés real al que se remunera el capital.

Segundo, una condición estática procedente del intercambio entre consumo y ocio, dado por el salario real W_t .

$$h_t = \left(\frac{W_t}{c_t \psi_h} \right)^v, \quad (3.18)$$

donde h_t es la oferta la de trabajo. El efecto sustitución es siempre mayor al efecto renta, es decir nuestro individuo aumentará las horas de trabajo en respuesta a un aumento salarial (el ocio es un bien normal).

Tercero, la decisión de los kilómetros conducidos m_t está determinada por una condición estática, dada por el stock de coches q_t según la forma:

$$m_t = \left(\frac{1}{q_t} \right)^{\frac{\gamma}{1-\varphi(1-\gamma)}} \left(\varphi \psi_s \frac{c_t}{o_t} \right)^{\frac{1}{1-\varphi(1-\gamma)}} \quad (3.19)$$

Vemos en esta ecuación una relación inversa entre los kilómetros recorridos y los costes operativos. Por ello cuando los costes operativos o_t , definido en la ecuación (3.7), o algunos de los componentes, se incrementan, los consumidores reducen la distancia conducida. El exponente $\frac{1}{1-\varphi(1-\gamma)}$ dada las restricciones en φ y γ comentados en párrafos anteriores sabemos que va a ser positivo. Este exponente es la elasticidad precio de los kilómetros recorridos con respecto a los costes operativos, es decir si los costes operativos aumentan un uno por ciento, los kilómetros recorridos disminuyen un $\frac{1}{1-\varphi(1-\gamma)}$ por ciento. En el artículo de Bento y otros (2009) estiman que esta elasticidad es de -0.74 por lo que un aumento de los costes operativos de un uno por ciento, disminuyen los kilómetros recorridos un 0.74%

También a partir de esta expresión se puede calcular la elasticidad precio de la demanda de combustible como $\left(\frac{1}{1-\varphi(1-\gamma)}\right)\left(\frac{p_t^F \omega_F}{o_t}\right)$, que es una porción de la elasticidad con respecto a los costes operativos. Bento y otros (2009) estiman que esta elasticidad precio es de -0.35.

Finalmente, la compra de nuevos vehículos está determinada por la condición dinámica de primer orden.

$$\begin{aligned} \frac{(1 + \tau_t^X)p_t^X}{c_t} = \beta E_t \left[(1 - \delta_q) \frac{(1 + \tau_{t+1}^X)p_{t+1}^X}{c_{t+1}} \right. \\ \left. + \psi_s m_{t+1}^{\varphi(1-\gamma)} q_{t+1}^{-\gamma} - \frac{1}{c_{t+1}} [o_{t+1} m_{t+1} + p_{t+1}^{TI}] \right], \end{aligned} \quad (3.20)$$

Los dos últimos términos de esta ecuación de Euler se pueden ver como la ganancia neta de poseer un coche en $t + 1$:

$$\Phi_{t+1} = \underbrace{\psi_s m_{t+1}^{\varphi(1-\gamma)} q_{t+1}^{-\gamma}}_{\text{Beneficio marginal}} - \underbrace{\frac{1}{c_{t+1}} [o_{t+1} m_{t+1} + p_{t+1}^{TI}]}_{\text{Coste marginal}} \quad (3.21)$$

La compra de un nuevo vehículo está asociada a un aumento del servicio, en contrapartida, unos costes operativos asociados a los kilómetros y unos costes fijos debido a la compra del vehículo.

Para el problema de maximización de las empresas, tenemos las condiciones de primer orden.

$$W_t = (1 - \theta) \frac{Y_t}{H_t} \quad (3.22)$$

$$R_t = \theta \frac{Y_t}{K_t} \quad (3.23)$$

Estas dos condiciones nos dicen que las empresas demandarán trabajo y capital hasta que la productividad marginal del trabajo y del capital coincida con sus costes de alquiler W_t y R_t respectivamente.

3.3 El equilibrio

Sea $\Omega_t = (k_t, q_t)$ el vector de variables de estado individuales. Dada una política del gobierno, $\{\tau_t^F, \tau_t^X, TR_t\}$, un equilibrio competitivo es un conjunto de reglas de decisión individuales:

$$\{c(\Omega_t), x(\Omega_t), h(\Omega_t), m(\Omega_t), k(\Omega_{t+1})\}.$$

En términos agregado se tiene que,

$$\{C(\Omega_t), X(\Omega_t), H(\Omega_t), M(\Omega_t), K(\Omega_{t+1})\}.$$

Los precios de los nuevos vehículos p^X , el precio del combustible p^F , el del mantenimiento y reparación p_t^{MR} , y el precio costes asociados a la tenencia de coche como los seguros y otros p_t^{TI} , son exógenos. El precio de los factores productivos; el salario (precio del trabajo) y precio de arrendamiento del capital vienen dados por:

$$\{W(\Omega_t), R(\Omega_t)\},$$

- Dada la maximización del consumidor (3.1), sujeto a la restricción presupuestaria (3.11), a la ley de acumulación del capital (3.10), a la ley de acumulación de vehículos (3.3), y la restricción de no negatividad, las familias deciden el consumo c_t , el capital que ahorran i_t , los coches que compran x_t , los kilómetros que conducen m_t y las horas que trabajan h_t , siguiendo las condiciones de primer orden anteriores.
- Dados los precios W_t, R_t , las empresas maximizan sus beneficios hasta que los factores productivos K_t, H_t estén siendo remunerados según su productividad marginal (3.22), (3.23).
- El gobierno satisface la restricción presupuestaria (3.16) en cada periodo.
- Todos los mercados se vacían: El mercado bienes de consumo, el mercado de vehículos nuevos, el mercado de capitales, el mercado de trabajo, y el mercado de combustible, talleres y de otros servicios.
- La decisión agregada coincide con las individuales de manera que

$$\begin{aligned} K(\Omega_{t+1}) &= k(\Omega_{t+1}), \quad Q(\Omega_{t+1}) = q(\Omega_{t+1}), \quad H(\Omega_t) = h(\Omega_t), \quad C(\Omega_t) = c(\Omega_t) \\ X(\Omega_t) &= x(\Omega_t) \end{aligned} \quad y$$

3.4 El planificador social y el impuesto Pigouviano

Consideramos a continuación un planificador social que es consciente de que el uso de vehículos lleva asociado una contaminación B_t expresada de la siguiente forma:

$$B_t = \emptyset \omega_F M_t Q_t + OF_t, \quad (3.24)$$

Es decir B_t representa las emisiones de gases contaminantes (indistintamente y por simplicidad NOx y CO), \emptyset expresa los gramos de emisiones de un contaminante g emitido por cada litro de combustible (sea diesel o gasolina). Recordemos que ω_F denota los litros que necesita el vehículo por kilómetro recorrido. Por último OF_t son otras fuentes de emisiones del gas g .

Vemos en la ecuación (3.24) que la incidencia del contaminante B_t sólo afecta al momento t . Esto se debe a que el tiempo de residencia medio de las emisiones locales son de apenas unos días (véase Van Loon y Duffy (2005) para el NOx y el SO2 y Weinstock (1969) para el CO). Por ello, asumimos que la contaminación de estos dos gases puede ser modelizada como un flujo de la forma expuesta.

El problema de optimización centralizado que se plantea el planificador social tiene en cuenta esta contaminación:

$$\max E_t \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t \left(\ln(C_t) + \psi_s \frac{M_t^{\varphi(1-\gamma)} Q_t^{1-\gamma} - 1}{1-\gamma} - \psi_h \frac{H^{1+\frac{1}{v}}}{1+\frac{1}{v}} - \Pi(B_t) \right) \quad (3.25)$$

con respecto a $(C_t, H_t, M_t, X_t, I_t, K_{t+1}, Q_{t+1})$, sujeto a:

$$C_t + p_t^X X_t + I_t + ((p_t^F \omega_F + p_t^{MR} \omega_{MR}) M_t + p_t^{TI}) Q_t = Y_t \quad (3.26)$$

$$K_{t+1} = (1 - \delta_k) K_t + I_t \quad (3.27)$$

$$Q_{t+1} = (1 - \delta_q) Q_t + X_t \quad (3.28)$$

Donde:

$$Y_t = A_t K_t^\theta H_t^{1-\theta} \quad (3.29)$$

$$B_t = \emptyset \omega_F M_t Q_t + OF_t \quad (3.30)$$

Nótese que en comparación con la utilidad del consumidor dada por (3.1) la utilidad que tiene en cuenta el planificador social está afectada por la externalidad negativa de la contaminación $\Pi(B_t)$. $\Pi(B_t)$ es una función débilmente convexa al igual que la usada por Parry y Small (2005)

Las condiciones de primer orden se pueden resumir del siguiente modo. Primero, una condición de primer orden dinámica que determina la decisión de inversión en capital k_t :

$$\frac{1}{C_t} = \beta E_t \left[\frac{1}{C_{t+1}} \theta \frac{Y_{t+1}}{K_{t+1}} + \frac{1}{C_{t+1}} (1 - \delta_k) \right], \quad (3.31)$$

Vemos que esta condición de primer orden coincide la del equilibrio competitivo (3.17).

Segundo, una condición estática que determina el intercambio entre consumo y ocio:

$$(1 - \theta) \frac{Y_t}{H_t C_t} = \psi_h \left(H_t^{1/v} \right), \quad (3.32)$$

al igual que en el caso anterior la solución del planificador social y la del equilibrio competitivo coinciden.

Tercero, la decisión de kilómetros conducidos está determinada por una condición estática, dada por el stock de coches Q_t :

$$\psi_s \varphi M_t^{\varphi(1-\gamma)-1} Q_t^{(1-\gamma)} - \frac{(p_t^F \omega_F + p_t^{MR} \omega_{MR}) Q_t}{C_t} = \emptyset \omega_F Q_t \Pi_{B_t} \quad (3.33)$$

Para el planificador social a diferencia de lo que ocurre en el equilibrio competitivo, el hecho de que los vehículos contaminen lo tiene en cuenta a la hora de decidir cuántos kilómetros se conducen. Π_{B_t} expresa la desutilidad marginal de las emisiones.

Por último, la compra de nuevos vehículos en el caso del planificador social está determinada por la condición dinámica de primer orden:

$$\begin{aligned} \frac{p_t^x}{C_t} = \beta E_t \left[\psi_s M_{t+1}^{\varphi(1-\gamma)} Q_{t+1}^{-\gamma} - \frac{1}{C_{t+1}} \left((p_{t+1}^F \omega_F + p_{t+1}^{MR} \omega_{MR}) M_{t+1} + p_{t+1}^{TI} \right) \right. \\ \left. + \frac{p_{t+1}^x}{C_{t+1}} (1 - \delta_q) - \emptyset \omega_F M_{t+1} \Pi_{B_{t+1}} \right] \end{aligned} \quad (3.34)$$

Al igual que en el caso anterior, para la compra de vehículos nuevos el planificador social tiene en cuenta que la desutilidad de las emisiones.

Conocidos estos resultados, podemos determinar cuáles deben ser los tipos impositivos τ_t^F, τ_t^X que induzcan a que la asignación competitiva sea eficiente. Las diferencias resultan de comparar las condiciones de primer orden para (m_t, x_t) . Las ecuaciones (3.19) y (3.33) representan la decisión de cuánto hay que conducir, m_t , para el caso competitivo y del planificador social respectivamente. Así, el impuesto pigouviano que internaliza el coste de esta externalidad viene dado por:

$$\frac{\tau_t^F}{c_t} = \emptyset \Pi_{B_t} \quad (3.35)$$

Vemos que el impuesto al combustible tiene una relación directa con las preferencias Π_{B_t} y con \emptyset que es la cantidad de contaminante por litro de combustible. La presencia de los catalizadores ha provocado que \emptyset se reduzca en el caso de las emisiones de NOx y CO. Por ejemplo, para el caso del NOx ese valor sería cercano a 0 en el caso de la gasolina y entre 0.012 a 0.008 gramos por cada litro de diesel según los valores extraídos de la Tabla 2.1.

De manera análoga se realiza el mismo procedimiento para conocer τ_t^X , para ello comparamos las ecuaciones de primer orden dinámicas sobre la compra de coches nuevos, igualamos la ecuación (3.28), (3.42). El resultado es el siguiente (para una demostración véase apéndice A):

$$\tau_t^X = 0 \quad (3.36)$$

Es decir los impuestos que gravan a los nuevos vehículos no sirven para internalizar los costes de la contaminación.

Este resultado sigue la línea expuesta por Conde-Ruiz J.I (2014) en donde hace un análisis del impuesto de matriculación en España publicado en el artículo 43 de la Ley 51/2007. Conde-Ruiz J.I (2014) resalta que el gobierno español usa el impuesto de matriculación para gravar los efectos de la polución potencial del vehículo. Ello ha llevado a gravar más a los vehículos potencialmente más contaminantes con independencia de tu uso. Por ello Conde-Ruiz J.I (2014) siguiendo la línea de los resultados de nuestro análisis, concluye que si lo que buscamos es gravar las emisiones reales debemos hacer uso del impuesto sobre el carburante y eliminar el impuesto de matriculaciones.

4. CALCULO DEL IMPUESTO PIGOUVIANO

Haciendo uso de la base de datos de Eurostat, hemos extraído qué parte de la renta total se destina a los distintos gastos derivados de los vehículos, resumido en la Tabla 4.1. Eurostat extrae estos gastos asociados a los vehículos para el cálculo del IPC en cada país de la unión. Por ejemplo en España tasa de inversión es del 20,20%, y el gasto en combustible es del 3.52%.

Tabla 4.1: Partidas de gasto relativas al PIB (euros del año 2010)

	Inversión	Combustible	Reparaciones	Seguro	Nuevos veh.
Austria	21.10%	2.85%	3.54%	1.23%	4.22%
Bélgica	20.10%	2.39%	3.32%	1.40%	3.68%
Dinamarca	16.70%	2.57%	2.71%	1.43%	---
Finlandia	19.10%	3.28%	3.45%	1.20%	5.13%
Francia	19.20%	3.39%	1.45%	1.56%	4.98%
Alemania	17.20%	3.34%	3.68%	1.18%	3.25%
Grecia	14.70%	3.58%	1.32%	1.18%	2.88%
Irlanda	13.60%	4.26%	1.37%	1.48%	3.76%
Italia	18.50%	4.21%	2.06%	2.05%	2.19%
Holanda	17.10%	---	---	---	---
Portugal	17.60%	5.65%	1.98%	1.04%	3.18%
España	20.20%	3.52%	2.38%	1.34%	2.82%
Suecia	18.10%	3.28%	1.49%	1.02%	2.71%
Reino Unido	14.40%	4.43%	2.80%	1.63%	3.80%
Media	17.69%	3.60%	2.43%	1.36%	3.55%

Fuente: Eurostat

Para hacer una aproximación de cuánto debe ser el impuesto sobre el combustible, τ_t^F , para que se internalice el coste asociado a las emisiones locales, NOx y CO, tenemos en cuenta la siguientes relaciones entre variables.

$$p_t^G \frac{G_t}{Y_t} + p_t^D \frac{D_t}{Y_t} = \frac{GTC_t}{Y_t} \quad (3.37)$$

$$\frac{D_t}{G_t} = RC_t \quad (3.38)$$

$$\tau_t^G \frac{G_t}{Y_t} + \tau_t^D \frac{D_t}{Y_t} = \frac{CE_t}{Y_t} \quad (3.39)$$

Donde p_t^G y p_t^D son los precios de la gasolina y del diesel, respectivamente (Tabla 2.4). G_t y D_t son el consumo total de gasolina y diesel respectivamente (Tabla 2.2). GTC_t es el gasto total de combustible Tabla 4.1, RC_t el ratio de consumo de combustible (Tabla 2.2) y CE_t los costes totales de las emisiones de NOx (Tabla 2.1) .

Dado $\left\{ \frac{RC_t}{Y_t}, \frac{GTC_t}{Y_t}, \frac{CE_t}{Y_t}, p_t^G, p_t^D \right\}$ necesitamos calcular $\left\{ \frac{G_t}{Y_t}, \frac{D_t}{Y_t}, \tau_t^G, \tau_t^D \right\}$ para lo cual necesitamos un supuesto adicional. Si hacemos que $\tau_t^G = \tau_t^D$, el gobierno entiende que tipo impositivo para las emisiones locales debe de ser igual para ambos combustible. En un segundo caso suponemos que $\tau_t^G = 0$, en él el gobierno usa parte de la información expuesta en el comienzo del trabajo donde se argumenta que las emisiones locales se deben principalmente a los

vehículos diesel debido a las características técnicas del motor. Por ello solo se le carga el impuesto al combustible diesel, y no al de gasolina.

Los resultados se resumen en la tabla 4.2 para el año 2010 en los distintos países de la Unión Europea. Con ello se ha calculado cual sería el impuesto que se deberían tener los combustibles en ese año según los dos casos.

Tabla 4.2: Imposición Pigouviana (€por litro de combustible)

	Caso 1		Caso 2	
	Diesel	Gasolina	Diesel	Gasolina
Austria	0.019	0.019	0.032	0.000
Bélgica	---	---	---	---
Dinamarca	0.008	0.008	0.023	0.000
Finlandia	0.010	0.010	0.027	0.000
Francia	0.016	0.016	0.023	0.000
Alemania	0.013	0.013	0.036	0.000
Grecia	0.008	0.008	0.161	0.000
Irlanda	0.000	0.000	0.001	0.000
Italia	0.008	0.008	0.016	0.000
Holanda	---	---	---	---
Portugal	0.005	0.005	0.007	0.000
España	0.021	0.021	0.032	0.000
Suecia	0.011	0.011	0.051	0.000
Reino Unido	0.006	0.006	0.019	0.000
Media	0.010	0.010	0.036	0.000
Unidades	Euros año 2010			

Fuente: Cálculos propios

Podemos ver que de media en los países de la Unión Europea deberían pagar 1 céntimo de euro por cada litro de diesel o gasolina para internalizar los daños producidos por el NOx. Si asumimos que sólo los vehículos diesel producen emisiones de NOx, entonces esa cifra aumenta a 3.6 céntimos por litro de diesel y nada para los vehículos de gasolina.

Usando los datos extraídos del trabajo de Rodríguez-López J. y otros (2015) podemos obtener también el tipo impositivo eficiente asociado a las emisiones de CO2. En dicho artículo, usando una calibración de un modelo dinámico de equilibrio general similar al usado en este trabajo, llega a la conclusión de que el impuesto pigouviano asociado a un litro de gasolina es de 1.2 céntimos de euros mientras en el asociado a los litros de diesel es de 1.4 céntimos de euro.

Si sumamos los impuestos de emisiones locales (producidos por los NOx) y añadimos a ello los cálculos realizados por Rodríguez-López J. y otros (2015) para internalizar los efectos de las emisiones en general, vemos que no se asemejan a los niveles de impuesto actuales. Esto se puede observar en la

Tabla 2.4, donde la cantidad de impuestos por cada litro de diesel y gasolina es mayor a los comentados en este trabajo. Esto se debe a que existen otras externalidades asociadas al uso de los combustibles como la dependencia del petróleo, la congestión, los accidentes de tráfico y otros como ruido. Estas externalidades están explicadas en Parry I., Walls M., Harrington W. (2007) que hace que dicho impuesto pueda ser mayor.

5. CONCLUSIONES

A lo largo del trabajo hemos visto como la instalación de catalizadores ha hecho que las emisiones locales (CO y NOx) de los vehículos de gasolina sean casi nulas, y que las de los vehículos diesel se hayan reducido considerablemente (más en el CO que en el NOx).

Del análisis de regresión se constata que los vehículos diesel, comparados con los de gasolina, emiten más NOx y más CO₂. En Europa se han reducido las emisiones de estos gases pero esta reducción podría haber sido mayor si no se hubiese dado un proceso de dieselización tan severo, que ha sido propiciado por una tributación menor sobre el litro de diesel que han incentivado el uso y compra de estos vehículos frente a los de gasolina.

El modelo planteado implica que se debe tributar no tanto al vehículo como al uso que se haga del mismo, de acuerdo con la carga de contaminación de cada tipo de combustible. Por ello el impuesto sobre el diesel debería ser mayor que el de gasolina. Esto no se cumple en ninguno de los países europeos estudiados. Es cierto que existen otras externalidades además de las estudiadas en este trabajo, pero los vehículos diesel no difieren de los de gasolina en esos aspectos. Usando el modelo, nuestros cálculos nos dicen que en España el impuesto para internalizar el CO y el NOx tendría oscilar entre 2,1 y 3,2 céntimos de euro por litro de diesel y hasta 2,1 céntimos de euro por litro de gasolina. Si añadimos los datos para internalizar los costes del CO₂, el impuesto aumenta 1,4 céntimos por litro de diesel y 1,2 céntimos de euro por litro de gasolina.

Según nuestro modelo, para internalizar los efectos de las emisiones locales, no es válido el impuesto de matriculaciones, en cambio sí es efectivo el impuesto sobre el combustible. A pesar de ello en España el impuesto de matriculaciones se usa para “internalizar” los efectos de las emisiones sobre el medio ambiente.

El reciente escándalo de Volkswagen ha hecho visible que los vehículos diesel son más contaminantes que los de gasolina. 800.000 vehículos diesel de la compañía Alemana han estado emitiendo gases nocivos para la salud por encima de los niveles máximos regulados, provocando costes sociales a cambio de mejorar el rendimiento energético de sus vehículos. Esto ha provocado que la compañía, precursora y líder en la venta de vehículos con

este combustible, se plantee el futuro con un parque móvil europeo menos dieselizado.

Las tributaciones en los combustibles deberían ir disminuyendo con el paso de los años a medida que se opte por combustibles más limpios, como es el caso de los coches eléctricos, que no emiten emisiones por el uso del vehículo si su energía procede de energías renovables. Sin embargo ganarán fuerzas otras externalidades asociadas con los vehículos en especial las asociadas con la congestión o las víctimas de accidentes, debido a que la flota de vehículos aumenta año tras año.

Bibliografía

1. Álvarez F., Marrero G.A., Puch L.A. (2006): Air Pollution and the Macroeconomy across European Countries
2. Bento A.M., Goulder L.H., Jacobsen M.R. y Von Haefen R.H. (2009): Distributional and Efficiency Impacts of Increased US Gasoline Taxes. *American Economic Review*. 99:3. 667-699
3. Bauer H., Cypra A., Beer A., Bauer H. (1995): Manual de la técnica del Automóvil, Bosch. *VDI Verlag GmbH, Düsseldorf*. 22º Edición. 422-434
4. Cando, C.J.C., (2013). "Investigation of knock limits of dual fuel engines" Department of energy, Budapest University of Technology and Economics.
5. Castillo L. D.A. (2015) Manual práctico para el aumento de rendimiento en motores de combustión por ignición.
<http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/38658/1/CastilloLagunes.pdf>
6. Conde-Ruiz J.I (2014): La "curiosa" historia del impuesto de matriculaciones: Lecciones y Propuestas. *Nada es gratis*. 14/02/2014.
<http://nadaesgratis.es/rubio-ramirez/la-historia-del-impuesto-de-matriculacion-lecciones-y-propuestas>
7. Environmental Protection Agency (2011): Greenhouse Gas Emission From a Typical Passenger Vehicle. <http://nnsa.energy.gov/sites/default/files/nnsa/08-14-multiplefiles/EPA%202011c.pdf>
8. Gonzalez R.M., Marrero G.A. (2012): Induced road traffic in Spanish regions: A dynamic panel data model. *Transportation Research Part A*, 46, 435-445.
9. Gonzalez R.M., Marrero G.A. (2012): The effect of dieselization in passenger cars emissions for Spanish regions: 1998-2006. *Energy Policy*, 51, 213-222.
10. Laurell M., Sjörs J., Wernlund B., Brück R., (2013): Commonised diesel and gasoline catalyst architecture. *MTZ worldwide*, 74:11. (30-35).
11. Ley 51/2007, artículo 43
<http://www.boe.es/boe/dias/2007/12/27/pdfs/A53286-53409.pdf>

12. Kenneth Y. Chay y Greenstone M. (2003): The impact of Air Pollution on Infant Mortality: Evidence from Geographic Variation in Pollution Shocks Induced by Recession. *The Quarterly Journal of Economics*. 118:3. 1121-1167.
13. Normativa Euro 6. <http://ec.europa.eu/environment/air/transport/road.htm>
14. Organización Mundial de la Salud (2005). "Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre".
http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/69478/1/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf
15. Parry I.W.H., Heine D., Lis E. y Li S. (2014): Getting Energy Prices Right. From Principle to Practice. *International Monetary Fund*.
16. Parry I.W.H., Small K.A. (2005): Does Britain or the United States have the Right Gasoline Tax?. *American Economic Review*, 95:4, 1276-1289
17. Parry I.W.H., Walls M. y Harrington W. (2007): Automobile Externalities and Policies. *Journal of Economic Literature*, 45:2, 373-399.
18. Payri F., Desantes J.M. (2011): Motores de combustión interna alternativos. *Reverte*.
19. Rodríguez-López J., Marrero G.A., González-Marrero R.M, D (2015): Dieselization, CO2 emissions and fuel taxes in Europe.
20. Volkswagen's Self-study programme: Motor Vehicle Exhaust Emissions. N° 230.
21. Sall K.A. y Verhoef E.T. (2007): The Economics of urban transportation. *Routledge*: New York
22. Van Loon, G.W., Duffy, S.J.: Environmental Chemistry. A Global Perspective. *Oxford University Press*, 2nd edition, Chipenham (U.K.) 2005.
23. Weinstock, B.: "Carbon Monoxide: Residence Time in the Atmosphere". *Science* 10 October 1969: Vol. 166 no. 3902 pp. 224-225.

APÉNDICE

Apéndice A: Matemático

El lagrangiano asociado al problema del consumidor viene dado por:

$$\mathcal{L} = \max \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t \left(\ln(c_t) + \psi_s \frac{m_t^{\varphi(1-\gamma)} q_t^{1-\gamma} - 1}{1-\gamma} - \psi_h \frac{h^{1+\frac{1}{v}}}{1+\frac{1}{v}} \right),$$

$$-\lambda_{1t} [c_t + (1 + \tau_t^x) p_t^x x_t + i_t + F_t + Z_t + Tl_t - W_t h_t - R_t k_t - TR_t],$$

$$-\lambda_{2t} [k_{t+1} - (1 - \delta_k) k_t - i_t],$$

$$-\lambda_{3t}[q_{t+1} - (1 - \delta_q)q_t - x_t]$$

Con respecto a $(c_t, h_t, x_t, m_t, i_t, k_{t+1}, q_{t+1})$. Donde los costes de operación del uso del automóvil o_t están definidos en (3.7), y en los servicios del automóvil definido en (3.2).

Las condiciones de primer orden están dadas por.

$$\begin{aligned} \frac{1}{c_t} - \lambda_{1t} &= 0, \\ -\psi_h \left(h_t^{1/\nu} \right) + \lambda_{1t} W_t &= 0, \\ -\lambda_{1t} (1 + \tau_t^X) p_t^X + \lambda_{3t} &= 0, \\ \psi_s \varphi m_t^{\varphi(1-\gamma)-1} q_t^{(1-\gamma)} - \lambda_{1t} o_t q_t &= 0, \\ -\lambda_{1t} + \lambda_{2t} &= 0, \\ -\lambda_{2t} + \beta \mathbf{E}_t [\lambda_{1t+1} R_{t+1} + \lambda_{2t+1} (1 - \delta_k)] &= 0, \\ -\lambda_{3t} + \beta \mathbf{E}_t \left[\lambda_{3t+1} (1 - \delta_q) + \psi_s m_{t+1}^{\varphi(1-\gamma)} q_{t+1}^{-\gamma} - \lambda_{1t+1} [o_{t+1} m_{t+1} + p_{t+1}^I] \right] &= 0, \end{aligned}$$

La maximización asociada a la empresa está dada por:

$$\max_{(K_t, H_t)} [A_t K_t^\theta H_t^{1-\theta} - W_t H_t - R_t K_t]$$

Con respecto a (H_t, K_t) . Las condiciones de primer orden están expresadas como:

$$\begin{aligned} W_t &= (1 - \theta) \frac{Y_t}{H_t} \\ R_t &= \theta \frac{Y_t}{K_t} \end{aligned}$$

El lagrangiano asociado al problema de maximizar del planificador social viene dado por:

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = \max \mathbf{E}_t \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t & \left(\ln(C_t) + \psi_s \frac{M_t^{\varphi(1-\gamma)} Q_t^{1-\gamma} - 1}{1-\gamma} - \psi_h \frac{H^{1+\frac{1}{\nu}}}{1+\frac{1}{\nu}} - \Pi(B_t) \right) \\ -\eta_{1t} [C_t + p_t^X X_t + I_t + ((p_t^F \omega_F + p_t^{MR} \omega_{MR}) M_t + p_t^{TI}) Q_t - Y_t], \\ -\eta_{2t} [K_{t+1} - (1 - \delta_k) K_t - I_t], \\ -\eta_{3t} [Q_{t+1} - (1 - \delta_q) Q_t - X_t] \end{aligned}$$

Con respecto a $(C_t, X_t, I_t, H_t, K_{t+1}, M_t, Q_{t+1})$, donde

$$\begin{aligned} Y_t &= A_t K_t^\theta H_t^{1-\theta}, \\ B_t &= \emptyset \omega_F M_t Q_t + O F_t \end{aligned}$$

Note que las condiciones de primero orden del planificador social y del equilibrio competitivo coinciden.

$$\begin{aligned}\frac{1}{C_t} - \eta_{1t} &= 0, \\ -\eta_{1t} p_t^X + \eta_{3t} &= 0, \\ -\eta_{1t} + \eta_{2t} &= 0,\end{aligned}$$

Tenemos además que condiciones de primer orden con respecto a las horas trabajadas y a la inversión en capital está dado por:

$$\begin{aligned}-\psi_h \left(H_t^{1/v} \right) + \eta_{1t} (1 - \theta) \frac{Y_t}{H_t} &= 0 \\ -\eta_{2t} + \beta E_t \left[\eta_{1t+1} \theta \frac{Y_{t+1}}{K_{t+1}} + \eta_{2t+1} (1 - \delta_k) \right] &= 0,\end{aligned}$$

Estas dos expresiones no difieren de las del equilibrio competitivo.

La clave de la distinción entre el equilibrio competitivo y el planificador social se encuentra en las condiciones de primer orden de los kilómetros recorridos y del stock de coches (M_t, Q_{t+1}) respectivamente. En estas condiciones de primer orden del planificador social ahora sí internaliza los costes de las emisiones quedando.

$$\begin{aligned}\psi_s \varphi M_t^{\varphi(1-\gamma)-1} Q_t^{(1-\gamma)} - \eta_{1t} ((p_t^F \omega_F + p_t^{MR} \omega_{MR}) Q_t) - \Pi_{B_t} \emptyset \omega_F Q_t &= 0, \\ -\eta_{3t} + \beta E_t \left[\psi_s M_{t+1}^{\varphi(1-\gamma)} Q_{t+1}^{-\gamma} - \eta_{1t+1} ((p_{t+1}^F \omega_F + p_{t+1}^{MR} \omega_{MR}) M_{t+1} + p_{t+1}^{TI}) \right. \\ \left. + \eta_{3t+1} (1 - \delta_q) - \Pi_{B_{t+1}} \emptyset \omega_F M_{t+1} \right] &= 0\end{aligned}$$

Para completar este apéndice matemático, vamos a añadir parte de los pasos en el que igualamos las condiciones de primer orden del planificador social y del equilibrio competitivo en (m_t, q_{t+1}) que da como resultado los impuestos τ_t^X y τ_t^F eficientes.

Primero igualando las condiciones de primer orden con respecto a m_t tenemos que:

$$\psi_s \varphi m_t^{\varphi(1-\gamma)-1} q_t^{(1-\gamma)} - \frac{(p_t^F \omega_F + p_t^{MR} \omega_{MR}) q_t}{c_t} - \frac{\tau_t^F \omega_F q_t}{c_t} = 0 \quad \text{para el E. Compet.}$$

$$\psi_s \varphi M_t^{\varphi(1-\gamma)-1} Q_t^{(1-\gamma)} - \frac{(p_t^F \omega_F + p_t^{MR} \omega_{MR}) Q_t}{C_t} - \Pi_{B_t} \emptyset \omega_F Q_t = 0 \quad \text{para el P. Soc.}$$

Si igualamos estas dos ecuaciones vemos que los dos primeros sumandos son iguales en las dos ecuaciones quedando:

$$\frac{\tau_t^F}{c_t} = \Pi_{B_t} \emptyset$$

La condición de primer orden con respecto a q_{t+1} del equilibrio competitivo es:

$$\frac{(1 + \tau_t^X)p_t^X}{c_t} = \beta \mathbf{E}_t \left[(1 - \delta_q) \frac{(1 + \tau_{t+1}^X)p_{t+1}^X}{c_{t+1}} + \psi_s m_{t+1}^{\varphi(1-\gamma)} q_{t+1}^{-\gamma} - \frac{o_{t+1} m_{t+1}}{c_t} - \frac{p_{t+1}^{TI}}{c_t} \right]$$

Además sabemos que la condiciones de primer orden del equilibrio competitivo con respecto a m_t es:

$$\psi_s m_{t+1}^{\varphi(1-\gamma)} q_{t+1}^{-\gamma} - \frac{o_{t+1} m_{t+1}}{c_t} = 0$$

Usando esa condición en el equilibrio competitivo, simplificamos la ecuación en

$$\frac{(1 + \tau_t^X)p_t^X}{c_t} = \beta \mathbf{E}_t \left[(1 - \delta_q) \frac{(1 + \tau_{t+1}^X)p_{t+1}^X}{c_{t+1}} - \frac{p_{t+1}^{TI}}{c_t} \right]$$

Por otro la condición de primer orden con respecto a q_{t+1} del planificador social es:

$$\frac{p_t^x}{C_t} = \beta \mathbf{E}_t \left[\psi_s M_{t+1}^{\varphi(1-\gamma)} Q_{t+1}^{-\gamma} - \frac{1}{C_{t+1}} ((p_{t+1}^F \omega_F + p_{t+1}^{MR} \omega_{MR}) M_{t+1} + p_{t+1}^{TI}) + \frac{p_{t+1}^x}{C_{t+1}} (1 - \delta_q) - \Pi_{B_{t+1}} \emptyset \omega_F M_{t+1} \right]$$

Además sabemos que la condiciones de primer orden del planificador social con respecto a m_t es:

$$\psi_s \varphi M_t^{\varphi(1-\gamma)-1} Q_t^{-\gamma} - \frac{(p_t^F \omega_F + p_t^{MR} \omega_{MR}) M_t}{C_t} - \Pi_{B_{t+1}} \emptyset \omega_F Q_t = 0$$

Si unimos estas dos expresiones nos queda:

$$\frac{p_t^x}{c_t} = \beta \mathbf{E}_t \left[(1 - \delta_q) \frac{p_{t+1}^x}{c_{t+1}} - \frac{p_{t+1}^{TI}}{c_t} \right]$$

Si comparamos esta última expresión extraída de las condición de primer orden del planificador social con respecto a q_{t+1} y lo comparamos con el competitivo que esta dado por

$$\frac{(1 + \tau_t^X)p_t^X}{c_t} = \beta \mathbf{E}_t \left[(1 - \delta_q) \frac{(1 + \tau_{t+1}^X)p_{t+1}^X}{c_{t+1}} - \frac{p_{t+1}^{TI}}{c_t} \right]$$

Vemos que esas dos expresiones son iguales si y solo si

$$\tau_t^X = 0$$

Apéndice B: Fuentes de datos

Analizamos la dinámica en la emisión de gases en los siguientes 14 países: Alemania, Austria, Bélgica, Dinamarca, España, Finlandia, Francia, Grecia, Holanda, Irlanda, Italia, Portugal, Reino Unido y Suecia. Debido a las limitaciones en algunas series, el análisis de las emisiones de CO₂ se limita al periodo 1990 hasta 2011.

De la base de datos *Free Energy Indicators* de la base *Odysee-mure*, se han obtenido las siguientes series para el periodo que abarca desde 1980 hasta 2012: series del parque de vehículos, series del consumo de combustible, matriculaciones de vehículos nuevos, kilometraje medio por unidad de vehículo, y emisiones de dióxido de carbono (CO₂) derivadas del uso de vehículos:

<http://www.indicators.odyssee-mure.eu/online-indicators.html>

En todos los casos se distinguen entre el combustible diesel y la gasolina. Las series están disponibles para los catorce países de la Unión Europea antes mencionados exceptuando los siguientes casos. Bélgica carece de registros de emisiones de CO₂ para todos los años. Para Finlandia, los datos de emisiones de CO₂ sólo están disponibles de 2005 a 2011. Para Alemania, finalmente, no hay datos de emisiones de CO₂ para el año 1990.

Para el caso de las emisiones de monóxido de carbono (CO) y de Óxidos de Nitrógeno (NO_x), ambas referidas al uso de vehículos de motor, las series de datos provienen de la Agencia Europea Medio Ambiental:

<http://www.eea.europa.eu/>

El periodo de observación en el caso del CO y NO_x es más limitado, desde 1990 hasta 2006. Todas las emisiones estudiadas están expresadas en toneladas. Las series están disponibles para catorce países de la Unión Europea antes mencionados.

Las series de precios de los combustibles gasolina y diesel se han obtenido de la base de datos de la Comisión Europea *Weekly Oil Bulletin*:

<http://ec.europa.eu/energy/en/statistics/weekly-oil-bulletin>

Ambos precios están expresados en céntimos de euros, con y sin impuestos (Impuesto de Valor Añadido e Impuesto de Hidrocarburos). Los datos están disponibles desde 1998 hasta 2011.

La serie del PIB y de población se ha obtenido de la base de datos de Eurostat.

<http://ec.europa.eu/eurostat/data/database>

La serie de PIB está expresada para los análisis realizados a precios constantes de 2010 y paridad de poder adquisitivo del mismo año. Pero en la base de datos original vienen expresados en billones de dólares y están disponibles desde 1980 hasta 2014. Para calcular el PIB per cápita, se ha

dividido el PIB entre la población de cada país. Los datos de población están disponibles para los mismos años que el PIB.