



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICA I)
INGENIERO INDUSTRIAL

PROYECTO FIN DE CARRERA

**ANÁLISIS DE COSTES Y BENEFICIOS DE LA IMPLANTACIÓN DEL
VEHÍCULO ELÉCTRICO**

RESUMEN

Autor: Ignacio Trigo Martínez

Directores: José Villar Collado
Cristian Andrés Díaz Durán
Pablo González Gascón y Marín

Madrid

Mayo 2013

ANÁLISIS DE COSTES Y BENEFICIOS DE LA IMPLANTACIÓN DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO

Autor: Trigo Martínez, Ignacio.

Directores: Villar Collado, José; Díaz Durán, Cristian Andrés; González Gascón y Marín, Pablo.

Entidad colaboradora: IIT – ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

RESUMEN DEL PROYECTO

Durante los próximos años en España, y en el resto del mundo, se espera que el número de vehículos eléctricos pueda crecer de forma masiva debido a las enormes y múltiples ventajas que ofrece en diversos aspectos como la reducción de las emisiones contaminantes, el ahorro en combustible o la disminución de la dependencia energética de los países en el petróleo.

Existen varios trabajos en los que se estudia el impacto que tendría en las redes de distribución y transporte, a nivel técnico, la penetración a gran escala de este medio de transporte. En muchos otros trabajos también se abordan temas referentes al despliegue de infraestructuras necesario para llevar a cabo esta implementación o al impacto en el mercado mayorista de energía eléctrica, pero muy pocos realizan un análisis coste-beneficio del impacto global.

El objetivo de este trabajo es estudiar en profundidad gran parte de las consecuencias de la implantación del vehículo eléctrico en España desde un punto de vista económico. Para lograrlo se ha creado un modelo coste-beneficio que considera aspectos como la infraestructura, los costes directos del vehículo y las distintas externalidades, y cuyos resultados pretenden ofrecer un balance económico global del impacto. Los resultados pueden servir de ayuda en el establecimiento de los sistemas de primas y tasas del sector eléctrico, los impuestos de los combustibles o la creación de un estándar de las estrategias de recarga del vehículo eléctrico.

Este Proyecto Fin de Carrera es continuación del Proyecto Fin de Carrera “Beneficios e inconvenientes de la penetración del Vehículo eléctrico en el sistema español”, realizado por Jose Arnau López-Leitón durante el curso 2011-2012. Además, gran parte de los resultados de este proyecto han sido presentados y aceptados en el

congreso internacional EEM13 (European Energy Markets 2013), en Estocolmo (Suecia), entre los días 27 y 31 de mayo del 2013.

La metodología seguida para la consecución de los objetivos ha sido la recopilación de la gran cantidad de datos necesarios para la creación del modelo, el diseño del modelo coste-beneficio empleado y la simulación de diversos escenarios propuestos.

Los escenarios considerados en la realización de las simulaciones se basan en diversas estrategias de recarga y en varios grados de penetración del vehículo eléctrico. Los niveles de penetración estudiados son: 5%, 20%, 40%, 70% y 100% del número total de vehículos existentes en España. Las estrategias de recarga son las utilizadas en el proyecto anterior, y están expuestas en la siguiente tabla:

PAC	Enchufa y carga o “carga tonta”
OPTC	Carga optima, sin generación
V2G	V2G limitado a la carga y generación del VE
V2GR	V2G completo: carga, generación y reserva secundaria

Para la búsqueda y recopilación de los datos necesarios se ha utilizado un gran número de fuentes relativas a cada uno de los aspectos estudiados. Estos se pueden dividir en 4 grupos según el elemento al que hacen referencia:

- **Costes de infraestructura:** Representan el coste de los elementos necesarios para llevar a cabo la introducción del vehículo eléctrico y está formado por los diversos puntos de recarga del vehículo, el centro que gestiona y controla dichos puntos y la ampliación necesaria de las redes de distribución de energía eléctrica. La siguiente tabla resume los costes de infraestructura obtenidos, en M€/año, para los distintos niveles de penetración considerados:

% Penetración	Puntos de recarga	Centro de gestión	Red de distribución	Costes de infraestructura
5%	4342	53	1042	5436
20%	17367	212	4166	21745
40%	34734	425	8332	43490
70%	60784	743	14580	76108
100%	86834	1062	20829	108725

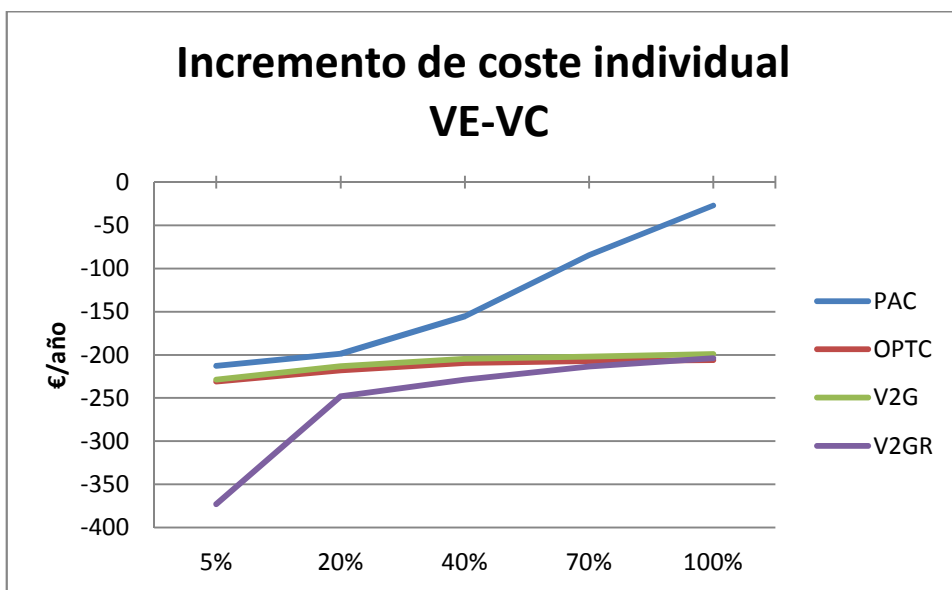
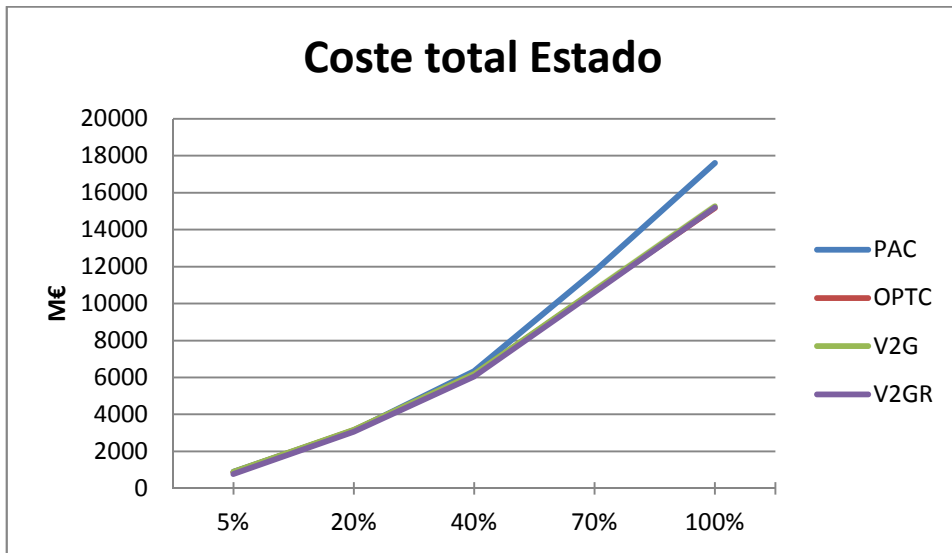
- Costes directos del vehículo eléctrico: Hacen referencia a los costes característicos más importantes de los vehículos eléctricos. Para este aspecto solo se han tenido en cuenta los elementos fundamentales que divergen entre los vehículos eléctricos y los de combustión, con el fin de realizar una comparación en coste. Los costes considerados son: baterías eléctricas, motores eléctricos/de combustión y el coste de mantenimiento de ambas clases de vehículos.
- Costes de las externalidades: La introducción del vehículo eléctrico supone también un impacto en algunos aspectos que no están relacionados directamente con el vehículo eléctrico. Los considerados en este trabajo son los que se presentan en la siguiente tabla, en M€/año:

% Penetración	Emisiones en la salud	Cambio climático	Contaminación acústica	Dependencia energética	Costes de externalidades
5%	-5293	-102	-206	-180	-5780
20%	-21170	-406	-822	-721	-23120
40%	-42341	-812	-1644	-1443	-46240
70%	-74097	-1421	-2877	-2525	-80919
100%	-105852	-2030	-4110	-3607	-115599

- Diseño de flotas: Para la simulación de los distintos escenarios se ha creado un diseño de las flotas de vehículos que pretende recrear el parque automovilístico español y los diversos perfiles de uso según la época del año, el horario, los movimientos de vehículos y otros aspectos. El diseño de las flotas es de un año completo.

El modelo coste-beneficio utilizado consta de dos partes diferenciadas: un modelo unit commitment hidro-térmico que proporciona precios de la energía eléctrica del mercado mayorista y de las reservas de energía, obtenido del proyecto anterior; y un modelo que realiza un balance económico de todas las variables anteriores junto con los costes y precios del sistema eléctrico.

Los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas proporcionan información acerca del coste neto para el Estado o para el usuario. Las siguientes gráficas representan el coste total anual, en M€, para el Estado y el incremento de coste individual, en €/año, de un vehículo convencional a un vehículo eléctrico para un consumidor:



Las conclusiones de los resultados muestran que la implantación del vehículo eléctrico en España no resultaría ser totalmente rentable para el Estado, suponiendo que fuera el único agente activo en la inversión en los costes identificados. Además, los resultados sugieren que los grandes niveles de penetración deberían ir acompañados de inversiones en energías renovables y de una estrategia de recarga del vehículo que permita la devolución de energía a la red y el uso del vehículo como reserva de energía.

Otro de los beneficios que acarrearía la expansión del vehículo eléctrico podría ser el aplanamiento de la curva de demanda. Los resultados muestran que las estrategias de carga que implican una optimización de la misma (OPTC, V2G y V2GR) permiten reducir los picos de demanda conforme aumenta la penetración hasta llegar a eliminarlos, obteniendo el aplanamiento casi total de la curva.

Por último, es importante mencionar que a este trabajo de investigación se le pueden aplicar mejoras, tanto referentes al modelo creado como a los datos de entrada, con el fin de obtener resultados más realistas sobre una posible introducción del vehículo eléctrico de forma masiva.

COST-BENEFIT ANALYSIS OF PLUG-IN ELECTRIC VEHICLES PENETRATION

ABSTRACT

During the next few years in Spain, and the rest of the world, the number of electric vehicle is expected to grow massively due to the huge advantages in several aspects such as emissions reduction, savings in decreasing fuel or lower energy dependence on oil.

There are many works in which the impact on the distribution and transportation networks are technically studied, the large-scale penetration of this transport. Many other studies also addressed issues related to the deployment of infrastructure necessary to carry out this implementation or the impact on electricity market. But few do a cost-benefit analysis of the overall impact.

The aim of this work is to study in depth many of the consequences of the introduction of electric vehicles in Spain from an economic standpoint. In order to achieve this goal, a cost-benefit model has been created. This model considers issues such as infrastructure costs, the direct costs of the vehicle and multiple externalities. The results claim to provide a global economic balance of the impact. The results may be helpful in establishing feed-in tariffs, redesigning fuel taxes or creating standard strategies of electric vehicle charging.

This work is a prosecution of "Advantages and disadvantages of plugged-in electric vehicles penetration in the Spanish system" by Jose Arnau Lopez-Leitón. Part of this work's results have been presented and accepted at the international congress EEM13 (European Energy Markets 2013), Stockholm (Sweden), between 27 and 31 May 2013.

The methodology used for the achievement of the objectives is: collecting the large amount of data needed to create the model, designing the cost-benefit model utilized and simulating a wide range of proposed scenarios.

Scenarios considered in the accomplishment of the simulations are based on mixing charging strategies and several penetration levels of the plugged-in electric vehicle. Penetration levels studied are: 5%, 20%, 40%, 70% and 100% of the total

number of vehicles in Spain. The following table presents the charging strategies used in the model, which were taken from the previous work:

PAC	Plug-and-charge or dummy strategy
OPTC	Optimal charging, but no V2G allowed.
V2G	V2G limited to PEV charge-generation
V2GR	Full V2G, PEV charge-generation and regulation allowed.

For the task of researching and collecting the necessary data, a large number of sources has been used in each of the considered aspects. These aspects can be divided into 4 groups:

- Infrastructure costs: They represent the cost of the elements needed to carry out the implementation of plugged-in electric vehicles and is formed by: various vehicle charging points, the center that manages and controls these points, and the extension of electrical distribution networks. The following table summarizes the infrastructure costs obtained, in M€/year, for the different penetration levels considered:

% Penetration	Charging Points	Management Center	Distribution Network	Infrastructure Costs
5%	4342	53	1042	5436
20%	17367	212	4166	21745
40%	34734	425	8332	43490
70%	60784	743	14580	76108
100%	86834	1062	20829	108725

- Direct costs: These costs refer to the costs of the most important characteristic of electric vehicles. In this group, the fundamental elements that diverge from electric and fuel vehicles are the only aspects taken into account, in order to make a comparison in cost. The costs considered are: electric batteries, electric/fuel engines and maintenance costs of both types of vehicles.

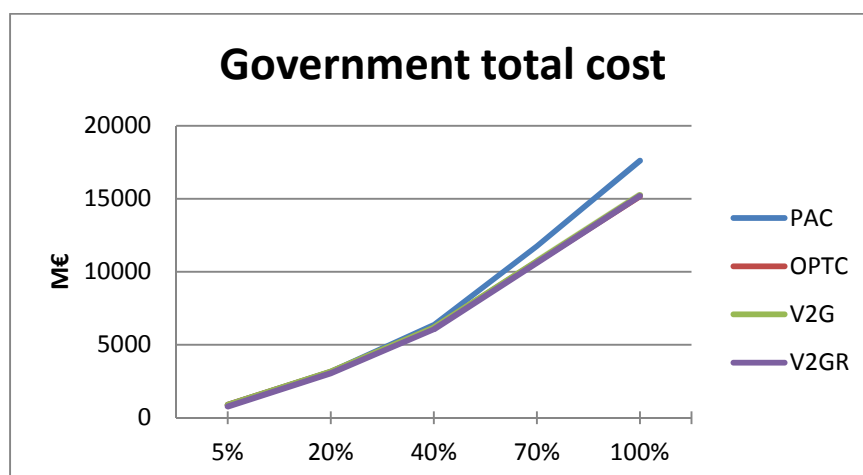
- Externalities costs: The introduction of electric vehicles also implies an impact on some aspects that are not directly related to the vehicle. Between those, the ones considered in this work are presented in the following table, in M€/year:

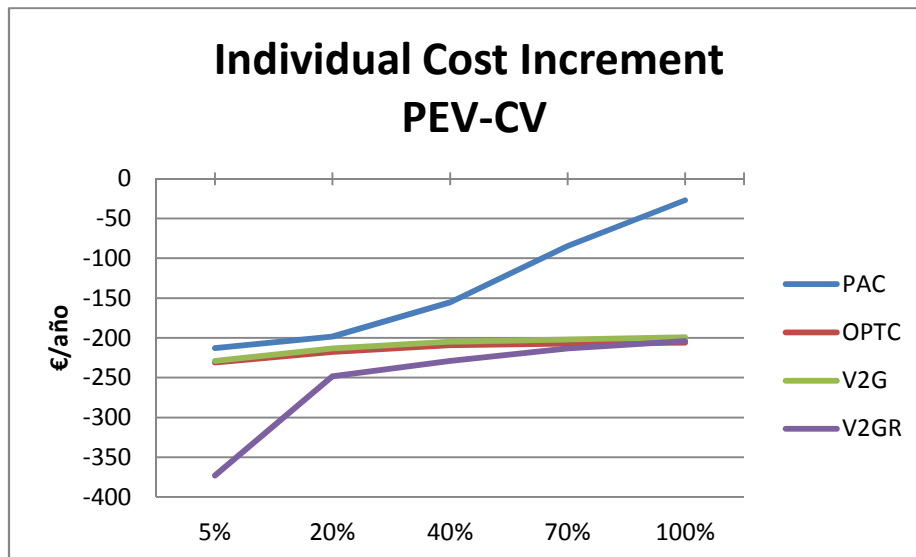
% Penetration	Emissions	Climate Change	Noise Pollution	Energetic Dependence	Externalities Costs
5%	-5293	-102	-206	-180	-5780
20%	-21170	-406	-822	-721	-23120
40%	-42341	-812	-1644	-1443	-46240
70%	-74097	-1421	-2877	-2525	-80919
100%	-105852	-2030	-4110	-3607	-115599

- Fleet designing: For the simulation of different scenarios, vehicles fleets have been designed, aiming to recreate the Spanish fleet and various usage profiles depending on time of year, time of the day, vehicle movements and other respects. The design of the fleet corresponds to an annual design.

The cost-benefit model used consists of two main parts: a hydro-thermal unit commitment which provides electricity and reserves market prices, and an economic model which get all the variables of the problem together and provides many results, using the inputs (charging strategies and level of penetration).

The results of the simulations provide information about the net cost for the Government or for the user of the plugged-in electric vehicles. The following graphs represent the total annual cost, in M€, for the government and the individual consumer cost increment, in €/year, from a conventional vehicle to a plugged-in electric:





The conclusions of the results show that the introduction of plugged-in electric vehicles in Spain would not be completely profitable for the government, in case of being the only active agent in the investment on the infrastructure costs. Furthermore, the results suggest that high levels of penetration should be accompanied by investment in renewable energy, and a vehicle charging strategy that allows the return of power to the grid and the use of the vehicle as an energy reserve.

Another benefit of the implementation of the electric vehicle may be a flattening of the demand curve. The results show that the charging strategies that involve optimization of the energy charged (OPTC, V2G and V2GR) reduce demand peaks with the increasing of the penetration, obtaining almost complete flattening of the curve.

Finally, it is important to mention that some improvements can be applied to this research work, both concerning the model created and the input data, in order to obtain more realistic information about a possible massive introduction of electric vehicles.