

Descarbonización de las administraciones públicas mediante la electrificación de los autobuses urbanos. Caso de estudio la ciudad de Vitoria

Decarbonisation of the public administration by the electrification of urban buses. Case study the city of Vitoria

Alejandro Rodríguez-Zúñiga¹, Mikel González-Eguino^{1,2} e Iñaki Arto¹

¹ BC3. Basque Centre for Climate Change (España)

² UPV/EHU. Universidad del País Vasco (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/9190>

La lucha contra el cambio climático requiere una descarbonización urgente de la economía global. Si bien se han reducido las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en la Unión Europea en los últimos años de manera conjunta, las correspondientes al sector del transporte han aumentado, poniendo de manifiesto que las actuales políticas de reducción de emisiones son insuficientes para alcanzar los objetivos establecidos para este sector. En el País Vasco el sector transporte representó el 40% de la energía total consumida en 2016 y fue responsable del 32% de las emisiones de GEI en ese año. A su vez, el transporte por carretera es el subsector que más energía demanda, pues supone el 80% del consumo total del sector del transporte y sus fuentes energéticas son en un 98% productos derivados del petróleo [1]. Este subsector provoca importantes impactos sobre el entorno y el medioambiente como la congestión del tráfico, la emisión de GEI, la alteración de la estructura territorial y la productividad agrícola, la explotación de recursos no renovables, los vertidos al medio marino, ruido y residuos. Además, es el principal causante de la contaminación del aire, lo que provoca estragos especialmente significativos en las ciudades y originando alrededor de 15.000 muertes prematuras en España según datos de la OMS [2].

El sector público juega un papel esencial en la lucha contra el cambio climático y debe ser ejemplo y referente para el

conjunto de la economía. En este trabajo se contempla la electrificación como la herramienta más eficiente para descarbonizar las flotas de vehículos de las Administraciones públicas y contribuir de esta manera a la descarbonización del sector público. Para ello, se ha realizado un análisis coste-beneficio económico, energético y ambiental de la electrificación de la flota de autobuses urbanos de Vitoria de la empresa Tuvisa. El principal resultado del estudio es que la tecnología eléctrica es más competitiva que la convencional, en el caso de los autobuses urbanos, si se elimina la devolución parcial del impuesto de hidrocarburos para las Administraciones públicas y se internalizan los costes ambientales derivados de los combustibles fósiles. Para avanzar en el proceso de electrificación de las flotas de vehículos, se proponen además otras dos medidas fundamentales: fomentar la compra conjunta de vehículos eléctricos para reducir los costes iniciales; y promover la compra pública verde.

1. MATERIALES Y METODOS

1.1. MATERIALES

Este estudio contemplaba inicialmente la electrificación de todas las flotas de vehículos de la Administración pública del País Vasco, sin embargo, y debido a la dificultad en conseguir los datos necesarios para el estudio, se ha realizado solo para la flota de autobuses urbanos de Vitoria. Actualmente la flota de autobuses de la empresa de autobuses urbanos de Vitoria, Tuvisa, tiene una edad media de 12 años. En el año 2017 se incorporaron 10 autobuses nuevos a la flota, pasando de 77 a 87 autobuses en total. La vida útil de los últimos vehículos adquiridos se estima en

15 años por lo que, para la comparativa con el modelo eléctrico, se considera el mismo periodo de tiempo. Los nuevos autobuses son de 18 metros de longitud y se adquieren en propiedad.

1.2. MÉTODOS

La metodología empleada se basa en un análisis del Coste-Beneficio¹ económico, energético y ambiental de la electrificación parcial de la flota de autobuses urbanos de Vitoria, y es extrapolable al resto de organismos de la Administración pública y a otras ciudades. Los costes totales de este análisis se pueden separar en: coste capital, que incluye coste inicial, subvenciones y valor residual; costes de operación y mantenimiento; y costes ambientales, que incluye costes sociales del CO₂, coste de las emisiones contaminantes y costes del ruido.

1.2.1. Coste capital

El coste capital, que incluye el coste inicial, las subvenciones y el valor residual, es a menudo el único coste que se tiene en cuenta al realizar este tipo de comparativas. Solamente teniendo en cuenta el coste inicial (precio del vehículo más infraestructura de recarga), el coste de un vehículo eléctrico es inicialmente muy superior a su homólogo convencional. Para este caso de estudio se ha estimado un coste capital de 355.000 € por autobús convencional [3] y 860.000 € por autobús eléctrico [4] (incluye infraestructura de recarga de tipo pantógrafo² y cargador en cochera³, y las baterías durante toda la vida útil del autobús⁴), acorde al precio actual de mercado.

Esta diferencia inicial tan elevada es una de las principales barreras para el despliegue de la electromovilidad, por ello, es imprescindible que las subven-

¹ El análisis coste-beneficio es una metodología utilizada para evaluar de forma detallada los costes y beneficios de un proyecto con el objetivo de determinar si es deseable desde el punto de vista económico y del bienestar social, y si lo es, en qué medida.

² Se han considerado 2 pantógrafos por línea de autobús y una densidad media de 5 autobuses por línea.

³ Se ha considerado un cargador nocturno por autobús.

⁴ Tiempo de depreciación de las baterías 8 años.

ciones para la adquisición de los nuevos vehículos vayan orientadas a la compra de vehículos eléctricos y no a la de vehículos convencionales o a la financiación de combustibles fósiles. Para este estudio no se han contemplado subvenciones en la compra de vehículos.

En cuanto al valor residual, la devaluación de la tecnología del motor de combustión a futuro hace más atractivo el mercado de segunda mano de los vehículos eléctricos, es decir, si comparamos dos autobuses de las mismas características, uno eléctrico y otro diésel, al final de su vida útil las previsiones apuntan a que en la medida en que haya menos mercado para los autobuses convencionales, los precios de estos autobuses se reducirán. Es posible por otra parte que se reacondicionen autobuses diésel a eléctricos como se está haciendo en EE.UU. con los camiones [5].

1.2.2. Coste de operación y mantenimiento

El coste de operación engloba todos los costes asociados a la utilización de los vehículos durante su vida útil (fundamentalmente el coste del combustible o el de la electricidad). El coste debido al nivel de utilización se supone el mismo en ambos casos, debido a que la demanda en movilidad no va a incrementarse por la electrificación de las flotas de autobuses actuales.

En cuanto al mantenimiento, en el caso de los vehículos eléctricos, éste es más sencillo y por tanto más económico al tener menos piezas y en particular, menos piezas móviles sometidas al desgaste. También se reducirán los costes de revisión de los sistemas de frenos, pues los vehículos eléctricos utilizan frenos regenerativos. Los costes de sustitución de baterías pueden ser por contra más elevados en particular en el caso de vehículos pesados, como los autobuses. No hay apenas estudios cuantitativos comparando el mantenimiento de vehículos eléctricos y de combustión interna y los que hay se refieren a vehículos de tipo turismo [6], por lo que para este estudio se van a suponer costes de mantenimiento equivalentes.

El coste de la energía es uno de los principales factores que inclinan la balanza a favor del vehículo eléctrico. Si bien es cierto que ahora mismo el coste energético de recargar un vehículo eléctrico es significativamente menor al coste de los combustibles fósiles en el caso de un vehículo de combustión interna (del orden de hasta 3 veces más barato), las expectativas en el aumento del precio de los combustibles fósiles, debido sobre todo al aumento de la fiscalidad para incluir el coste

de todas las externalidades medioambientales, hacen que esta diferencia pueda aumentar en los próximos años.

Según datos de la Agencia Internacional de la Energía (IEA) la evolución del precio del barril seguirá una progresión ascendente durante los próximos años. De los distintos escenarios de evolución en el precio del crudo planteados por el BEIS "Department for Business, Energy and Industrial Strategy of UK", se ha seleccionado el escenario "BEIS central" [7].

A partir de los datos facilitados por Tuvisa, se ha estimado una evolución del precio del diésel en línea con la evolución del precio del barril de petróleo. Para la Administración pública se ha estimado una evolución que va desde 0,89 €/l en el año 2017 hasta superar el 1,34 €/l en el año 2032 a un precio medio de 1,19 €/l en los próximos 15 años. Si utilizamos el precio de mercado, 1,065 €/litro en 2017 y aplicamos una evolución similar, el precio final del diésel alcanzaría un valor de 1,60 €/litro en el año 2032, con un precio medio en 15 años de 1,42 €/litro de diésel (figura 1). Si bien las Administraciones públicas obtienen una devolución parcial del impuesto de hidrocarburos por uso profesional⁵, para la realización de la comparativa en este estudio se ha utilizado el precio del diésel de mercado.

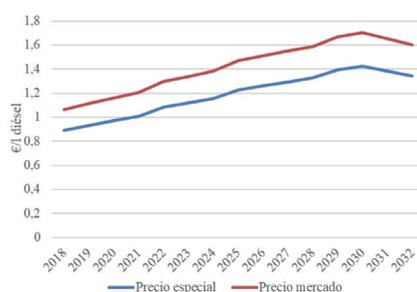


Fig. 1: Evolución del precio del diésel a precios corrientes de 2016 con una tasa de descuento social del 3%. Fuente: Elaboración propia a partir del informe del BEIS: fossil fuel price assumptions 2017 escenario central

El precio de la electricidad no sufrirá una variación tan significativa según datos de la Comisión Europea (CE) [8] (figura 2). En particular en el caso de España, se supone que la tarifa eléctrica podría verse reducida un 25% en 2030 por la financiación del déficit de tarifa y las subvenciones a las renovables. Según Red Eléctrica de España el coste del kWh para baja tensión en el año 2017 durante el día rondaba los 0,1470 € después de impuestos y el precio de la tarifa nocturna

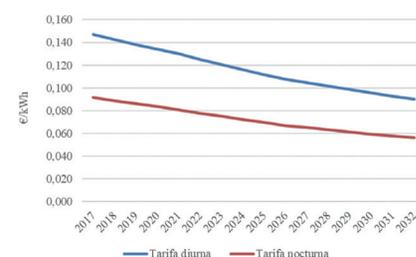


Fig. 2: Evolución del precio medio de la electricidad para el pequeño consumidor a precios corrientes de 2016 con una tasa de descuento social del 3%. Fuente: Elaboración propia a partir de los escenarios realizados por la CE

de supervalle alrededor de 0,0915 €/kWh. También habría que tener en cuenta el nivel de tensión al que se realiza la recarga, ya que a mayor tensión menor es el coste de consumirla. Para los autobuses que se recarguen mediante pantógrafo durante el día y mediante conexión a la red por la noche se tomará el valor medio de ambas tarifas del PVPC⁶ durante los próximos 15 años, es decir, 0,092 €/kWh si aplicamos una tasa de descuento social del 3% a los escenarios de la Comisión Europea.

1.2.3. Costes ambientales

Los costes ambientales derivados de las actividades del transporte se pueden clasificar en costes sociales del CO₂, costes de las emisiones contaminantes y costes del ruido. El coste social del CO₂ es una medida, del daño a largo plazo causado por una tonelada de dióxido de carbono en un año dado.

La EPA (United States Environmental Protection Agency) ha estimado el coste social del CO₂ en el año 2020, con una tasa de descuento del 3%, en torno a los 37 € la tonelada de CO₂ y una evolución creciente durante los próximos años hasta alcanzar los 45 € la tonelada en el año 2035 [9], esto implicaría un precio medio en los próximos 15 años de aproximadamente 40€/ton CO₂ (figura 3).

Para calcular el coste de las emisiones contaminantes de los autobuses conven-

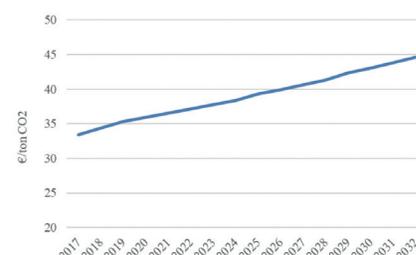


Fig. 3: Coste social del CO₂ €/ton con una tasa de descuento social del 3%. Fuente: Elaboración propia a partir del informe EPA fact sheet social cost of carbon

⁵ Art. 52 Ley 38/1992, de 28 de diciembre BIS

⁶ Precio Voluntario para el Pequeño Consumidor.

cionales se han utilizado los valores de emisión de cada autobús en función de la normativa vigente en el momento de su compra (tabla 1), multiplicándolos por el coste unitario de dichas emisiones según datos del Fondo Monetario Internacional

Normativa	NOx	CO	HC	PM 2.5
EURO 6 (g/kWh)	0,4	1,5	0,13	0,01
EURO 6 (g/litro)	4,55	17,06	1,48	0,11

Tabla 1. Emisiones contaminantes según normativa Euro 6 para vehículos pesados. Fuente: Reglamento 595/2009

Para la estimación de los costes marginales del ruido ambiental, la mayor parte de los estudios que se han dedicado específicamente a cuantificar los daños provocado por el ruido del tráfico de carreteras, se centran en las molestias ocasionadas a los usuarios por la exposición al ruido. Sin embargo, recientes avances en el enfoque de los costes marginales del ruido se basan en estimaciones más específicas de parámetros relacionados directamente con la salud.

Andersson y Ögren en un informe publicado en el 2011, presentan estimacio-

Coste CO ₂	Coste NO _x	Coste PM 2.5	Coste SO _x	Coste Ruido
40 €/ton	14.000 €/ton	22.000 €/ton	10.000 €/ton	0,0120 €/km

Tabla 2. Coste de las emisiones contaminantes. Fuente: Fondo Monetario Internacional y otros

[10] y otras fuentes [11]. En este caso, los autobuses convencionales cumplen con la normativa Euro VI (tabla 2).

Debemos precisar que, tanto en el caso de las emisiones de NOx como de PM 2.5, los valores correspondientes a los estándares EURO son teóricos. Las emisiones en el mundo real son a menudo significativamente más altas. Éste es el caso de las emisiones de NOx del diésel. Entre las normativas EURO 1 y EURO 5, el límite europeo de NOx ha disminuido en un factor de cinco, pero las emisiones de NOx en el mundo real se han mantenido más o menos constantes. Algunos vehículos EURO 6 ahora muestran emisiones de NOx reales más cerca del límite, pero muchos otros modelos de vehículos en el mundo real todavía exceden el límite por un factor de ocho [12].

nes para Suecia [13]. Allí, el coste medio del ruido para los vehículos pesados se estima entre 1,2 y 1,6 céntimos de euro por vehículo-km. El coste del ruido depende del tipo de ciudad, tráfico y momento del día. El coste más elevado corresponde a la combinación menos favorable: entorno urbano, tráfico poco denso y trayecto nocturno. Por la gran incertidumbre que refleja este valor, se ha decidido utilizar el coste más bajo (0,012 €/vkm).

También se han tenido en cuenta los daños provocados por la contaminación en la producción de energía eléctrica. Para calcularlo, se han utilizado los datos de emisiones de los contaminantes atmosféricos del inventario nacional y se han estimado los costes ambientales de la electricidad correspondiente para cada autobús. Para ello se ha considerado que toda la generación es producida en el entorno urbano.

Sin embargo, las plantas de generación eléctrica no suelen estar situadas en los núcleos urbanos, y a pesar de que se produzca un transporte de los contaminantes atmosféricos, los efectos se reducirían en función de la distancia de las centrales generadoras con respecto a los núcleos de población. Por lo tanto,

podemos considerar que se trata de un enfoque conservador y, además, hay que tener en cuenta que la previsión del cierre del carbón en los próximos años y la introducción de energías renovables en el mix eléctrico nacional reducirá sustancialmente los contaminantes atmosféricos relacionados con la generación eléctrica.

2. RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados del análisis coste-beneficio. El coste total de ambas tecnologías durante toda su vida útil (15 años), considerando los costes iniciales, costes de operación y costes ambientales, asciende a 1.070.076 € para el autobús convencional y a 1.032.853 € para el autobús eléctrico, es decir, la tecnología eléctrica es un 3,5 % más barata que la convencional con las hipótesis que hemos utilizado (figura 4).

La mayor diferencia económica entre ambas tecnologías se encuentra en el coste capital, 860.000€/autobús eléctrico frente a los 355.000€/autobús convencional. No obstante, se espera que a medida que el coste de las baterías se reduzca en los próximos años, también lo haga el precio de los vehículos eléctricos.

El segundo factor más destacado es el coste de la energía. En el caso del autobús convencional, el gasto energético durante toda su vida útil alcanza los 630.140€ (un 177% de la inversión inicial). En el caso del autobús eléctrico, el gasto en electricidad durante toda la vida útil es de 142.921€⁷ (un 17% de la inversión inicial). La tecnología eléctrica presenta a su vez una reducción muy importante en cuanto a la dependencia energética con el exterior, lo que supone un ahorro medio de 29.582 litros de combustible por autobús y año.

Los costes sociales del carbono suponen para el autobús convencional un total de 46.598€ teniendo en cuenta un factor de emisión de 2,668 kgCO₂/litro de diésel, y en el autobús eléctrico 13.555 € teniendo en cuenta las emisiones de CO₂ asociadas al actual mix eléctrico español⁸. Además, las expectativas de penetración de renovables en el sistema eléctrico y el cierre de las centrales de carbón en los próximos años también apuntan a un descenso considerable en las emisiones de CO₂ por kWh.

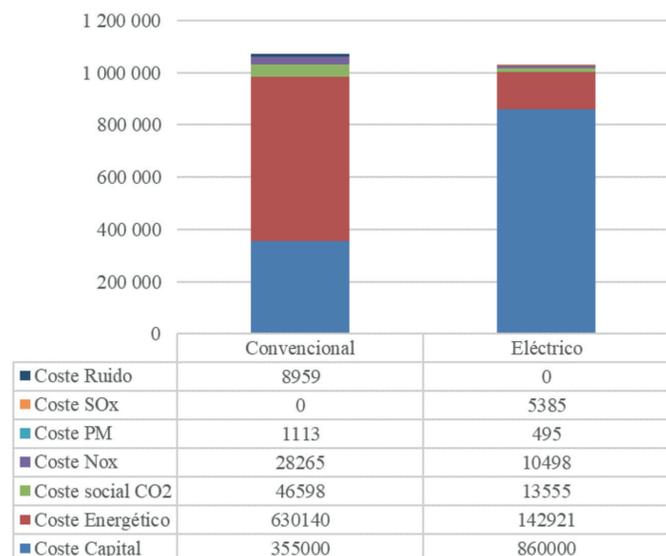


Figura 4: Comparativa de los costes totales de un autobús convencional frente a uno eléctrico. Fuente: Elaboración propia

⁷ Consumo energético medio de un autobús eléctrico de 18m: 1,875 kWh/Km.

⁸ Emisiones medias de CO₂ del mix energético español en 2018: 246 grCO₂/kWh.

Los otros costes ambientales (NOx, SOx, emisiones de PM2.5 procedentes de los humos de escape y ruido ambiental⁹) suponen un total de 38.338 € en el autobús convencional, siendo 16.378 € en el caso del autobús eléctrico con las hipótesis utilizadas¹⁰. Los costes externos derivados de la utilización de un autobús convencional durante toda su vida útil suponen por tanto 84.936 € (un 8% del coste total del autobús) y en el caso del autobús eléctrico, todos los costes externos suponen 26.875 € por autobús (un 2% del coste total).

Si comparamos ambas tecnologías desde el punto de vista ambiental, la alternativa eléctrica supone una reducción muy elevada en emisiones, en torno al 71% de reducción en emisiones de CO2 con respecto al convencional, una reducción total en cuanto a emisiones contaminantes (NOx y PM2.5) procedentes de los humos de escape, y una considerable reducción de ruido ambiental.

3. DISCUSIÓN

A la vista de lo expuesto en los capítulos anteriores, se puede afirmar que las Administraciones y servicios públicos pueden tener un papel decisivo en la descarbonización del sector transporte por medio de la electrificación de sus flotas de vehículos, en particular la flota de autobuses urbanos. Además, la concienciación ciudadana depende en gran parte de las políticas utilizadas por los organismos públicos, por lo que, la descarbonización del sector público puede ser una palanca

importante en la descarbonización de la economía global.

Este estudio ha reflejado que la tecnología eléctrica, en el caso de los autobuses urbanos, es ya más competitiva que la mejor tecnología convencional actual. Las hipótesis de comparación de alternativas son incluso muy conservadoras. El cálculo de las emisiones de los autobuses convencionales se ha realizado con los valores teóricos, y en el caso de las emisiones procedentes de la generación eléctrica se ha considerado que éstas afectan completamente en el entorno urbano. Por lo tanto, la suma de los costes externos derivados de la utilización de combustibles fósiles sería todavía mayor en el caso de los autobuses convencionales si se utilizaran los valores reales, y menores para el caso de los autobuses eléctricos.

RECOMENDACIONES

En primer lugar, analizar la influencia de los distintos parámetros en el coste total de ambas tecnologías permite identificar qué valores tienen un peso mayor sobre los costes totales. Como se ha demostrado, el precio del combustible para el autobús convencional tiene un peso muy relevante. Por ello, la primera recomendación para que el vehículo eléctrico sea más competitivo es eliminar la devolución parcial del impuesto de hidrocarburos para las Administraciones públicas.

El coste inicial sigue siendo el principal factor diferencial entre ambas tecnologías. Para reducir el coste capital de un autobús eléctrico, la segunda recomendación es que las compras de autobuses eléctricos se realicen de forma conjunta. Este sistema consiste en reunir varios municipios interesados en electrificar su flota de autobuses y realizar un solo pedido, unificando en lo posible los modelos solicitados, en vez de que cada municipio establezca sus propios acuerdos, permitiendo abaratar el coste unitario de cada autobús.

La tercera recomendación es que se tengan en cuenta los costes externos derivados de la utilización de combustibles fósiles. La cuantificación económica de los daños ambientales, sociales y para la salud, ayuda a que quienes tengan que tomar una decisión de compra lo hagan teniendo en cuenta todos los impactos de utilizar combustibles fósiles. La integración de estos costes en el coste total de la compra permite una comparación más justa entre ambas alternativas.

La cuarta recomendación es que, se incluyan criterios medioambientales claros y

verificables para los productos y servicios en el proceso de contratación pública, de manera que se promueva la compra pública verde y no sea el aspecto económico el único factor que determine la adquisición de un tipo de vehículo u otro.

A la vista de lo indicado anteriormente, resulta evidente, por lo tanto, que incluso en este ejercicio comparativo con hipótesis conservadoras, la tecnología eléctrica es ya una alternativa más económica en el largo plazo a la movilidad convencional en el caso de los autobuses urbanos.

REFERENCIAS

- [1] IDAE (2018). "Consumo y emisiones de CO2". IDAE website.
- [2] OMS (2015). "Economic cost of the health impact of air pollution in Europe". OMS website.
- [3] Ayuntamiento de Vitoria (2016). "Tuvisa adjudica la compra de 10 autobuses, que llegarán a Vitoria-Gasteiz en 2017". Nota de prensa.
- [4] BNEF (2018). "Electric Buses in Cities. Driving Towards Cleaner Air and Lower CO2". BNEF web.
- [5] Fine H. (2018). "Versatility Key for Xor: Electric Trucks, Next-Gen Batteries, Modular Chassis". Los Angeles Business Journal.
- [6] Hagman, J. et al. (2015). "Total cost of ownership and its potential implications for battery electric vehicle diffusion". Journal of Research in Transportation Business & Management, vol. 18, p 11-17.
- [7] BEIS (2017). "Fossil fuel Price assumptions". BEIS website.
- [8] Comisión Europea (2016). "EUCCO scenarios". CE website.
- [9] EPA (2016). "Social Cost of Carbon". EPA website.
- [10] International Monetary Fund (2014). "Getting Energy Prices Right. From Principle to Practice". IMF website.
- [11] Markandya A. et al. (2018). "Health co-benefits from air pollution and mitigation costs of the Paris Agreement: a modelling study". Lancet Planet Health, vol. 2, Issue 3, p 126-133.
- [12] International Transport Forum (2017). "Real-world Emissions". ITF website.
- [13] Andersson, H., Ögren M. (2011). "Noise Charges in Road Traffic: Pricing Schedule Based on the Marginal Cost Principle". Journal of Transportation Engineering, vol. 137, no.12, p. 926-933.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación cuenta con el apoyo del Gobierno Vasco a través del programa BERC 2018-2021 y del Ministerio de Economía y Competitividad MINECO a través de la acreditación de excelencia María de Maeztu recibida por el BC3 MDM-2017-0714. La realización del estudio no hubiera sido posible sin la colaboración de la empresa Tuvisa (empresa de autobuses urbanos de Vitoria) que facilitó los datos fundamentales para el estudio, y el EVE e IHOBE que nos facilitaron asimismo información muy relevante y nos prestaron soporte durante el desarrollo del proyecto.

⁹ Una de las principales ventajas de los vehículos eléctricos es, la ausencia de ruidos procedentes del motor de combustión. Esto reduce considerablemente los niveles de ruido debidos al tráfico por carretera, sobre todo en el entorno urbano, ya que el ruido proveniente del motor de combustión es el más notable a bajas velocidades (por debajo de los 30 km/h), entre los 30 km/h y los 80 km/h el ruido debido al contacto entre los neumáticos y el suelo es el más acusado, y a partir de los 80 km/h también contribuye el ruido aerodinámico.

¹⁰ En este caso de estudio no se han tenido en cuenta las partículas PM10 procedentes de los frenos ni de la re-suspensión de partículas del suelo. Hay algunas fuentes que consideran que estas partículas son mayores en los vehículos eléctricos debido al mayor peso de estos (provocado por las baterías), pero lo que sí que es cierto es que las debidas a los frenos son menores debido a que los vehículos eléctricos tienen frenos regenerativos, lo que hace que frenen de forma suave, sin tener que pisar apenas el pedal del freno salvo frenadas de emergencia donde sí se utilizan los frenos tradicionales.