

UN NUEVO PARADIGMA DE LA MOVILIDAD: EL AUTOBÚS ELÉCTRICO

Ignacio Villalba Sanchis

Profesor, Universitat Politècnica de València, España

Ricardo Insa Franco

Profesor, Universitat Politècnica de València, España

Pablo Salvador Zuriaga

Profesor, Universitat Politècnica de València, España

Pablo Martínez Fernández

Investigador, Universitat Politècnica de València, España

RESUMEN

Con respecto al transporte público, uno de los principales pilares de la movilidad urbana actual y futura en nuestras ciudades recae el autobús. Durante los últimos años y con el impulso de las nuevas políticas y leyes, la movilidad eléctrica pública está en auge, gracias al desarrollo tecnológico que ha permitido que la electricidad poco a poco vaya ganando terreno al resto de combustibles.

En efecto, los autobuses eléctricos están llamados a ser una de las principales soluciones de transporte en las ciudades, si bien su implantación está siendo relativamente lenta a excepción de China, donde hoy en día circula el 98% de los autobuses eléctricos del mundo.

Así, son muchas las ciudades que en los últimos años se han interesado por el cambio de su flota y la incorporación de autobuses eléctricos, con el claro objetivo de reducir las emisiones asociadas al transporte urbano. Sin embargo, la transición hacia el mundo eléctrico plantea serias dudas por la inherente novedad de estos nuevos vehículos, los costes de adquisición y mantenimiento, la necesidad de disponer de nuevas infraestructuras de carga, la complejidad técnica de esta nueva tecnología, así como la falta de experiencia con este tipo de autobús.

Bajo este escenario, el presente artículo pretende proporcionar una visión global sobre todos aquellos aspectos que condicionan la transición eléctrica de los autobuses, destacando el gran reto al que se enfrentan las ciudades para desplegar con eficacia amplias flotas de autobuses eléctricos.

1. INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas, el transporte urbano y metropolitano ha crecido de forma notable, ligado especialmente a la expansión y el crecimiento de las grandes aglomeraciones urbanas. En particular, el crecimiento económico y del empleo en las grandes ciudades supone alrededor del 85% del PIB de la UE, por lo que son el motor del crecimiento económico.

Ahora bien, pese a las mejoras económicas proporcionadas por las ciudades, el bienestar y la calidad del aire han ido disminuyendo de forma drástica, ligado a la dependencia del transporte de los combustibles fósiles. Pese a las mejoras introducidas en los motores de combustión y la aplicación sucesivas normas EURO, el aumento de las emisiones de gases derivados de la combustión en los motores térmicos no ha hecho más que aumentar.

Así pues, en la actualidad en 23 de los 27 países de la UE se superan los estándares de calidad del aire (European Commission, 2016). Con respecto a los autobuses, en Europa son responsables aproximadamente del 0.3% de emisión de Monóxido de Carbono (CO), un 5% de Hidrocarburos (HC), un 9% de Óxidos de Nitrógeno (xNO), un 7.7% de las partículas en suspensión y un 5% de Dióxido de Carbono (CO₂).

Si bien en términos generales la contribución de las emisiones de los autobuses urbanos es relativamente reducida, es cierto que es necesario llevar a cabo esfuerzos para mejorar la eficiencia de estos, de la misma forma que están realizando otros vehículos. En particular, las mejoras se fundamentan en tres grandes bloques de medidas: medidas de fomento del cambio modal, el uso racional de los medios de transporte y la renovación de flotas.

En cuanto a las medidas de cambio social y uso racional del vehículo, son numerosas las actuaciones implantadas por las ciudades, con resultados muy diversos. En cuanto a la renovación de flotas, en la actualidad se plantea una gran oportunidad para mejorar la eficiencia: los autobuses eléctricos.

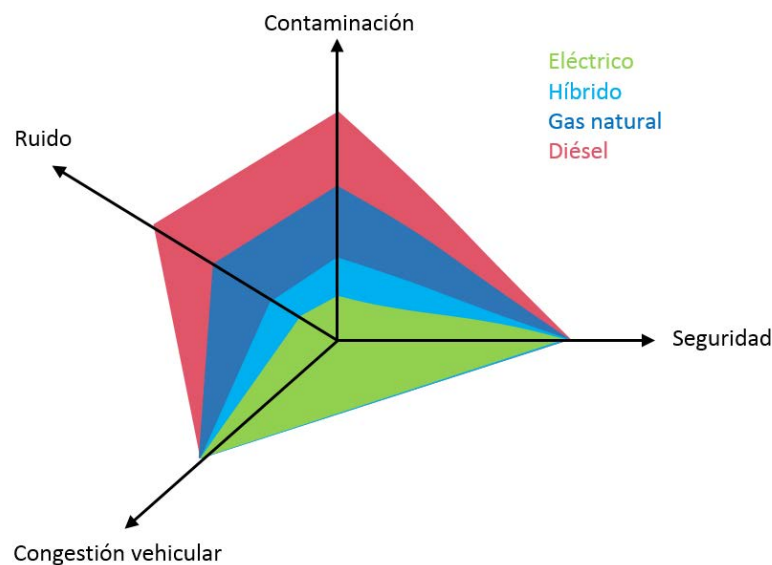


Figura 1: Comparación de los costes externos entre los modelos de buses de transporte público

En efecto, a lo largo del continente europeo son ya muchas las ciudades que están intentando apostar por el estudio, diseño e implantación de líneas de autobuses eléctricos, siendo parte de los programas fomentados por la Agencia Europea de Medio Ambiente.

Por ello, el presente artículo se centra en el estudio de los autobuses eléctricos en cuanto a su viabilidad económica, medioambiental y social que puede tener la utilización de este tipo de autobuses en las ciudades.

2. AUTOBUSES ELÉCTRICOS

En los últimos años la tecnología que sustenta el desarrollo de los autobuses urbanos ha experimentado un cambio notable. En particular, en el año 2019 circularon por las vías urbanas de diferentes ciudades más de 425.000 autobuses eléctricos, de los cuales el 99% está concentrado en diversas ciudades de China. Esto se debe a que, si bien la Unión Europea es una de las regiones punteras en investigación e innovación ecológica, los mayores productores de autobuses eléctricos se encuentran localizados en Asia. No obstante, se trata de un tipo de vehículo que se está adoptando en muchas ciudades europeas, destacando Ámsterdam, Berlín, Milán, o París, cuyos objetivos establecen la necesidad de tener toda su flota libre de emisiones para el año 2030.

Si bien existen muchos criterios y condicionantes técnicos, los autobuses eléctricos se caracterizan por ser aquellos vehículos que poseen un funcionamiento 100% eléctrico, al obtener la energía necesaria para realizar su función únicamente a través de motores eléctricos. En la actualidad, tanto los vehículos como las infraestructuras de carga son tecnologías emergentes con un alto grado de diversidad técnica, pero, al mismo tiempo, existe un número limitado de proveedores.

En cuanto a la forma de almacenar la energía, podemos destacar que existen tres grandes sistemas o tecnologías: baterías, catenaria e inducción.



Figura 2: Tecnologías existentes para los autobuses con motores eléctricos

2.1 Baterías

En este tipo de autobuses la energía se encuentra almacenada a bordo por medio de baterías. De esta forma, son la tipología de autobús eléctrico que presenta, a día de hoy, las mayores ventajas para su implantación en las redes de autobús modernas.

Si bien la tecnología de baterías presenta muchas alternativas técnicas, pudiendo clasificarse según el tipo de materiales utilizados y/o los métodos de carga empleados, en este apartado se llevará a cabo una descripción sintetizada con el objetivo de determinar las ventajas e inconvenientes que presentan este tipo de autobuses.

Entrando en materia, los materiales utilizados en las baterías que se instalan en los autobuses eléctricos están formadas, principalmente, por alguno de estos tres elementos: plomo-ácido, níquel y ion-litio. Con respecto a las baterías de plomo (Pb-acid), éstas están compuestas por cátodo de dióxido de plomo, una placa de plomo como ánodo y un electrolito de ácido sulfúrico diluido. Esta configuración está contrastada y es barata, siendo posible reciclar la misma al final de su vida útil. Sin embargo, la baja densidad de energía, su elevado peso y los largos tiempos de carga merman sus propiedades.

En cuanto a las baterías de níquel (níquel-cadmio Ni-Cd y níquel-hidruro metálico Ni-MH), poseen una mejor densidad de energía que las de plomo y un mayor número de ciclos de carga. Sin embargo, son poco eficientes en los procesos de carga y descarga y presentan problemas en bajas temperaturas. El impacto ambiental es elevado, por lo que ha llegado a prohibirse las de Ni-Cd.

Por último, la tecnología de baterías que ha facilitado el desarrollo de vehículos eléctricos está basada en el Litio. En este campo existen diferentes modelos, como son las de ion de litio (Li-ion), las de polímero de litio (Li-Po) y las de litio-ferrofosfato (LiFePO₄). Este tipo de baterías poseen una alta densidad, poseen un peso ligero y bajo coste, lo que las hace

especialmente útiles para su empleo en vehículos como los autobuses. Además, su mayor virtud reside fundamentalmente en la rapidez de carga, pues permite la carga completa en pocos minutos en función del sistema de carga que se emplee.

Tipo de batería	Voltaje nominal (V)	Dens. de energía (Wh/kg)	Poder específico (W/kg)	Ciclo de vida	Coste (\$/kWh)	Impacto ambiental
Pb-acid	2.0	35 (baja)	180 (Pesada)	1000	60	Muy elevado
Ni-Cd	1.2	50-80	200	2000	250-300	Muy elevado (cadmio)
Ni-MH	1.2	70-95	200-300	<3000	200-250	Bajo
ZEBRA	2.6	90-120	155	>1200	230-345	Bajo
Li-ion	3.6	118-250	200-430	2000	150	Muy bajo
Li-Po	3.7	130-225	260-450	>1200	150	Muy bajo
LiFePO4	3.2	120	200-4500	>2000	350	Muy bajo
Li-S	2.5	350	-	300	100-150	En desarrollo
Zn-air	1.65	1400	80-140	200	90-120	En desarrollo
Li-air	2.9	1520-2000	-	100	-	En desarrollo

Tabla 1: Resumen de características de baterías para autobuses eléctricos.

Además de los elementos descritos, en la actualidad están desarrollándose otro tipo de baterías con el objetivo de mejorar la carga el rendimiento obtenido. De entre las más destacadas, es posible citar las de litio-azufre (Li-S), las zinc-aire (Zn-air) y las de litio-aire (Li-air). En la Tabla 1 se recogen las principales características de cada una de estas tecnologías.

2.1.1 Métodos de recarga

Tal y como ocurre con otros dispositivos provistos de baterías, tanto la durabilidad como el rendimiento de las mismas está directamente vinculado con la forma en la que se realiza la carga y descarga. Por este motivo, resulta fundamental analizar los procesos de carga realizados actualmente (Young et al., 2013), tal y como se verá en el apartado siguiente.

2.1.2 Autonomía

Una decisión importante y estratégica es la relativa a la autonomía o capacidad de almacenaje de las baterías. En efecto, es fundamental considerar que, para un autobús de 12 m, es posible emplear baterías con un rango de operación de pocos km (unos 50-60 km) hasta baterías con autonomía cercana a los 400-500 km. En realidad, pese a la aparente necesidad de autonomía, la verdadera cuestión se centra no tanto en los kilómetros disponibles con una carga, sino en las oportunidades de carga de la misma a lo largo del itinerario. Este aspecto se debatirá más adelante.

En cuanto a aspectos técnicos, la autonomía de la batería afecta negativamente a la capacidad de los pasajeros, pues a medida que se requiere mayor autonomía aumenta el volumen de la batería, lo que reduce la capacidad para alojar pasajeros, a la vez que aumenta el coste de adquisición y el peso del vehículo. Hay que tener presente que la batería representa, a día de hoy, alrededor del 50% del coste de un autobús eléctrico.

2.2 Catenaria

Este sistema de carga, similar al empleado por los trenes, se basa en el suministro de energía a través de cables suspendidos que se conectan al autobús. Tradicionalmente los vehículos que emplean este tipo de sistema son llamados trolebús. La principal ventaja reside en los costes relativamente reducidos frente al resto de alternativas, pues los componentes y los vehículos son más económicos, además de aligerar el peso de los mismos por no ser necesario el uso de baterías a bordo. Algunos países donde existe este tipo de autobús son: Rusia, República Checa, Eslovaquia, China, Canadá, Ecuador, Argentina, Paraguay, Nueva Zelanda e Italia, entre otros.

Sin embargo, su mayor inconveniente reside en que la ruta es rígida. Si bien es cierto que el uso de una pequeña batería hace que este tipo de autobuses pueda realizar maniobras y pequeños desplazamientos sin el suministro energético proporcionado por los cables. No es tan sencillo modificar un recorrido de forma rápida y sencilla, pues es necesario desplazar los cables que aportan la energía.

Además, existe un cierto impacto visual y una limitación de altura, pues los vehículos que circulan bajo la misma deben respetar un margen de seguridad para evitar problemas.

2.3 Inducción

En cuanto a las tecnologías de inducción, hay que tener presente que los vehículos que usan este sistema poseen baterías, las cuales se cargan mediante la citada inducción. En cierta medida, este sistema únicamente cambia el sistema de carga, pero se sigue manteniendo el dispositivo de almacenaje en el vehículo. La diferencia respecto al sistema convencional de baterías reside, fundamentalmente, en la tecnología y forma en la que se produce la recarga.

En particular, la carga inductiva se lleva a cabo mediante un campo electromagnético generado por unas bobinas situadas en el suelo, capaz de generar un cierto voltaje a otras bobinas alojadas en el autobús y que son las que se encargan de cargar las baterías del vehículo. De esta forma, el proceso de recarga puede ser llevado a cabo en las paradas, en la propia vía por donde circula el vehículo o en depósito.

3. INSTALACIONES DE RECARGA DE BATERÍAS

Analizando las tecnologías de carga existentes, el autobús eléctrico posee 3 opciones claramente diferenciadas: carga en depósitos, en paradas (de oportunidad) y el cambio de baterías.

Cada una de estas tecnologías tiene distintas implicancias operacionales y requiere una infraestructura particular, lo que resulta en diferencias importantes respecto de la gestión, mantenimiento y operación que habitualmente se lleva a cabo con autobuses convencionales.

En concreto, la programación de horarios, el dimensionamiento de la capacidad de la batería, las estaciones de recarga y los ciclos de conducción deben establecerse en función de las características de los sistemas de recarga establecidos. Así pues, las tecnologías de recarga en depósitos y en paradas parecen ser las tecnologías con mayores beneficios, las cuales se describen a continuación.

3.1 Recarga en depósitos

La terminal de carga está instalada en la cochera donde, en las horas nocturnas donde no hay servicio, los autobuses están conectados a cargadores que recargan las baterías por un periodo e intervalo de tiempo determinado, según el sistema de carga y la batería empleada.

En particular, el tiempo de carga es variable, pudiendo ir desde los 30 minutos hasta las 8-9 horas, pues depende de la capacidad de la batería, el nivel inicial de la misma y la tipología, entre otros aspectos.

En este tipo de modelos los autobuses necesitan instalar unas baterías con gran capacidad, pues es necesario que posean una autonomía suficiente a lo largo del día para cubrir todas las actividades. De lo contrario, pese a que se podría plantear su uso con una menor autonomía, existe el inconveniente de no poder estar circulando durante todas las horas que dura un servicio diario.

A su vez, este tipo de instalaciones requiere un gran espacio y un coste asociado que puede ser importante, así como un complejo sistema de gestión de las baterías.



Figura 3: Esquema de recarga en depósitos

3.2 Recarga en paradas

3.2.1 Recarga en cabecera de las paradas

En este caso, los puntos de carga están instalados en tanto en la parada inicial como final de la línea por la que circula el autobús. Este esquema permite una infraestructura de carga mucho más económica respecto a la recarga en paradas, debido a la reducción en el número de cargadores necesarios. A su vez, el proceso de recarga se simplifica puesto que los buses se mantienen en carga durante los tiempos que permanecen en las cabeceras para conceder tiempo de descanso a los conductores, así como también tiempo para regular la línea, en caso de desajuste.

Con este escenario se debe considerar si el tiempo que están los vehículos parados en la cabecera es suficiente para satisfacer la recarga necesaria para mantener la autonomía del autobús a lo largo de su funcionamiento, en función de su consumo eléctrico y de la capacidad de los sistemas de carga considerados.

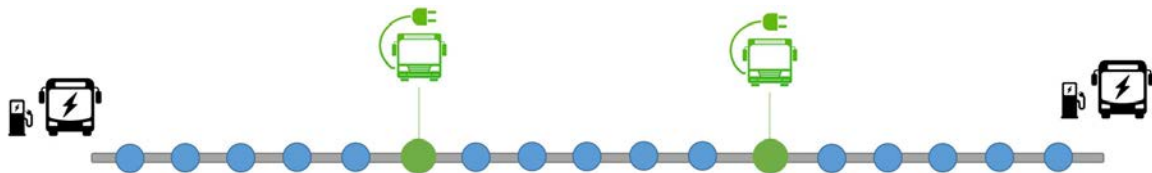


Figura 4: Esquema de recarga en cabecera de paradas

3.2.2 Recarga en paradas intermedias

En este esquema los terminales de carga se localizan en todas las paradas (o gran parte de las mismas) a lo largo del recorrido del autobús. El tiempo de carga es mínimo (tiempo durante subida/bajada de viajeros), por lo que los sistemas de carga deben tener gran capacidad para poder suministrar mucha energía en un corto período de tiempo. Tanto la cantidad de puntos de carga como las necesidades energéticas hacen que este esquema de operación sea de los más costosos frente a las otras alternativas.

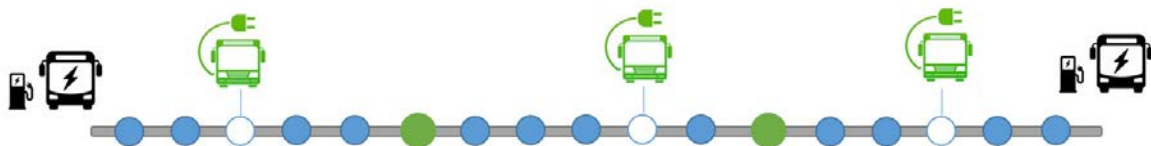


Figura 5: Esquema de recarga en paradas intermedias

3.3 Cambio de baterías

Existen varias ciudades chinas donde se han realizado pruebas en estaciones de intercambio de baterías (Beijing, Jinan y Zhengzhou). Para ello los autobuses tienen una capacidad y configuración de batería similar a la de la carga de rápida, pero siendo en este caso reemplazadas por robots que permiten extraer las baterías descargadas y reemplazarlas por baterías cargadas, cuyo proceso implica un tiempo entre los 10 a 20 minutos.

Si bien se han llevado a cabo diferentes pruebas, las estaciones de intercambio de baterías son muy caras, los autobuses deben regresar necesariamente a estas estaciones para efectuar el cambio y los sistemas de intercambio de baterías no están estandarizados, por lo que no parece ser una alternativa que tenga demasiado futuro.

4. CONSUMO ENERGÉTICO

La demanda energética para un autobús eléctrico depende de múltiples factores, como la velocidad, distancia de la ruta, número de pasajeros, temperatura, topografía, calidad de la vía y comportamiento del conductor. En términos generales y según las diferentes pruebas realizadas en distintas ciudades europeas, el consumo para vehículos de 12 m varía entre los 0,7 y 2,8 kWh/km.

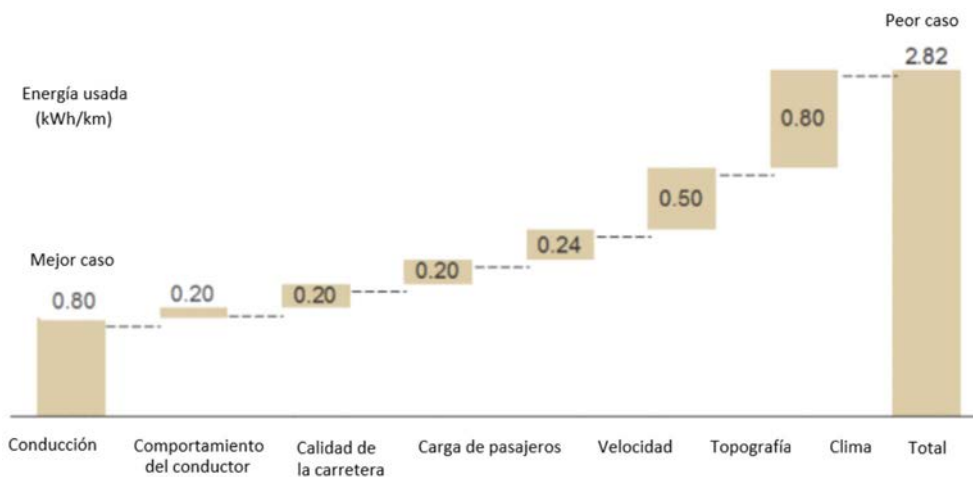


Figura 6: Consumo energético según diferentes aspectos. Fuente: Andersson, M. (2014). Energy storage solutions for electric bus fast charging stations.

En este sentido es importante hacer notar que el rendimiento se hace muy sensible a las condiciones climáticas. Los consumos pueden llegar a ser 50% mayores en temporadas muy cálidas y con alto uso del sistema de aire acondicionado o, por el contrario, en tiempos de mucho frío y un alto uso de calefacción.

Por otro lado, de cara a la explotación hay que tener presente que es altamente recomendable que las baterías funcionen en un rango entre los 15% y el 85% de su capacidad total, con el objetivo de asegurar el buen funcionamiento a lo largo de la vida útil y minimizar la pérdida de la capacidad a medida que aumenta el número de ciclos de carga.

Otro aspecto a considerar son las temperaturas de funcionamiento de las baterías. En efecto, tanto las altas como las bajas temperaturas pueden influenciar tanto el rendimiento como el proceso de carga. En particular, para temperaturas bajas se estima que el rendimiento se reduce alrededor del 10% a 0°C, 20% a -20°C y 25% a -30°C.

Por último, hay que tener presente que los vehículos eléctricos pueden contar con dos tipos de frenado: el mecánico y el eléctrico.

El frenado eléctrico es aquel que se realiza mediante la conexión de una impedancia variable con el generador que está acoplado a la transmisión, obteniendo así una desaceleración paulatina que depende de la velocidad y la posición del pedal de freno. Basa su efecto en actuar como generador cuando el vehículo se encuentra desacelerando, recuperando así la energía cinética desde las ruedas y convirtiéndola en electricidad, mejorando el rendimiento

Por otro lado, sólo para la detención total o para frenados críticos, se utiliza el freno mecánico convencional.

5. ESTRATEGIAS PARA IMPLANTAR LÍNEAS CON AUTOBUSES ELÉCTRICOS

Uno de los grandes retos que enfrenta el uso de autobuses a batería es el montaje y puesta en operación de la infraestructura de recarga de alta potencia necesaria para hacer posible el funcionamiento de una ruta de autobuses electrificada. En este caso abordaremos las particularidades asociadas a una línea de autobús eléctrico con batería, al ser la opción que mayor interés posee en la actualidad.

Es importante hacer notar que los sistemas de transporte masivo que usan energía eléctrica se han de desarrollar simultáneamente con los sistemas de distribución de electricidad. Este aspecto debe ser resuelto para garantizar una adecuada planificación de la expansión y aumento de capacidad de un sistema de transporte, en relación con la generación, distribución y transmisión de energía, minimizando las afectaciones que puedan limitar la capacidad de oferta del servicio de transporte.

Aspectos como la cantidad de estaciones de carga que se necesitan, el número de cargadores, la programación de los períodos de carga para evitar demoras son aspectos a determinar previo a la implantación de este tipo de autobuses.

A su vez, el efecto de una red de autobuses eléctrico en la red de distribución varía según cómo se abastece su demanda, en que puntos de la red, cuando y en qué cantidad se requiere la potencia de abastecimiento, etc. Además, los autobuses eléctricos necesitan transformar la energía eléctrica procedente de la red mediante la conversión de corriente alterna a continua y viceversa, utilizando equipos de electrónica de potencia, rectificadores e inversores.

Otro de los aspectos claves en la explotación de este tipo de autobuses lo constituye la autonomía. En los últimos años, se han reportado en numerosos documentos información sobre el rendimiento de buses híbridos y eléctricos. En efecto, la evaluación de la demanda

energética se ha convertido en un requisito previo importante para la planificación y el despliegue de grandes flotas de autobuses eléctricos y la infraestructura de carga requerida.

6. CONCLUSIONES

Los vehículos eléctricos están cobrando una relevancia cada vez más notable en todo el mundo, en gran medida por lo benéficos medioambientales que presentan en cuanto a la reducción de emisiones en las ciudades. En este sentido,

De esta forma, a lo largo del presente artículo se ha puesto de manifiesto los factores y condicionantes respecto a la implantación de líneas de autobús urbano basado en vehículos eléctricos con baterías.

El gran reto al que se enfrentan las ciudades en su transición hacia el mundo eléctrico recae no sólo sobre la infraestructura, sino que debe considerar la forma de operar este nuevo tipo de vehículo, por lo que es necesario explorar las diferentes estrategias de carga para determinar aquella más adecuada según las necesidades de cada ciudad.

En particular, las decisiones que se tomen en los estadios más tempranos dependerá el buen funcionamiento de las futuras líneas urbanas.

Así pues, para garantizar el buen desarrollo e implantación de líneas urbanas eléctricas las ciudades se deben explorar mecanismos innovadores para adquirir y financiar la compra tanto de vehículos como de infraestructuras de carga, así como para garantizar la coordinación de las partes interesadas.

REFERENCIAS

ANDERSSON, M. (2014). Energy storage solutions for electric bus fast charging stations: Cost optimization of grid connection and grid reinforcements.

EUROPEAN COMMISSION (2016). Environmental Implementation Review: new way to help Member States apply EU rule benefits citizens, administrations and economy. http://europa.eu/rapid/press-release_IP-17-197_en.htm

YOUNG, K., WANG, C., WANG, L. Y., & STRUNZ, K. (2013). Electric Vehicle Battery Technologies. En J. P. Rodrigo Garcia-Valle, Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks, pp.15-56. New York: Springer Science Business Media.