

# Impacto de las nuevas tecnologías de baterías en el diseño optimizado de flotas de autobuses urbanos

Isabel Carrilero<sup>1</sup>, Manuela González<sup>1</sup>, David Anseán<sup>1</sup>, Jorge Alonso<sup>1</sup>, Luciano Sánchez<sup>2</sup>, Paulo G. Pereirinha<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Oviedo, Dpto. Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Computadores y Sistemas, Spain

<sup>2</sup>Universidad de Oviedo, Departamento de Informática, Spain

<sup>3</sup>IPC-ISEC, Polytechnic Institute of Coimbra and INESC-Coimbra, Portugal

**Resumen**—El acuerdo de París de 2015 (COP21) marcó el primer acuerdo mundial sobre el clima. En 2018, en Katowice, (COP24) la Unión Europea ratificó la estrategia “Un planeta limpio para todos”, y asignó un presupuesto de más de 1.000 millones de euros para mantener el incremento de temperatura global por debajo de los 2 °C, destacando el apartado para fomento del transporte público eléctrico en las ciudades.

Aunque las flotas de autobuses eléctricos se encuentran todavía en una fase incipiente en términos de aplicación pública, se están desarrollando múltiples proyectos piloto a nivel mundial en ciudades con características muy distintas (tamaño, orografía, clima, etc.). Se trata fundamentalmente de comprobar la eficiencia, flexibilidad, seguridad, coste, etc. del binomio autobús-sistema de recarga. Sin embargo, el resultado va a depender en gran medida de que la tecnología de baterías empleada en el autobús se haya seleccionado adecuadamente: la batería debe responder a los requerimientos del vehículo y adecuarse a la estrategia de recarga.

Este artículo se centra en el desarrollo actual y tendencias de futuro tanto de los autobuses eléctricos con baterías (BEBs) como de las estrategias de recarga, y su relación con la introducción en el mercado de las nuevas tecnologías de baterías de litio-ion.

**Palabras clave** — Autobuses eléctricos con baterías (BEBs), Baterías de litio-ion, Carga rápida y frenado regenerativo.

## I. INTRODUCCIÓN

El transporte es la principal causa de contaminación atmosférica en las ciudades [1]. El dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y las partículas finas (PM) son los principales contaminantes atmosféricos del transporte por carretera, y los causantes de que en 23 de los 28 Estados miembros de la Unión Europea se sigan superando las normas de calidad del aire [2]. Casi toda la población que vive en ciudades europeas está expuesta a niveles de contaminantes atmosféricos considerados perjudiciales para la salud según las directrices de la Organización Mundial de la Salud [3], estando asociados con problemas cardiovasculares y respiratorios que incrementan la mortalidad [4] [5].

Por estos motivos, algunos países están planeando prohibir los vehículos diésel y muchas ciudades están implantando zonas de emisiones reducidas o nulas (Ámsterdam, Atenas,

Barcelona, Bruselas, Copenhague, Hamburgo, Liverpool, Londres, Madrid, Milán, Oslo, Oxford, París, Roma...).

Los estudios demuestran que los vehículos eléctricos a baterías contribuyen a reducir de forma importante las emisiones de gases invernadero y la contaminación del aire de las ciudades [6]. Por ello, son muchas las ciudades que se han comprometido a adquirir sólo autobuses de emisiones cero a partir de 2025 (y a garantizar emisiones nulas para 2030) [7][8]. En concreto, en Europa se encargaron 1.031 autobuses eléctricos con baterías (Battery Electric Buses, BEBs) en 2017 frente a los 400 autobuses de 2016; se estima que esto equivale aproximadamente al 9% de la cuota de mercado de los nuevos registros en 2018 (City/urban European bus market in 2015 [9]). En general, las flotas de BEBs están mostrando una flexibilidad operativa comparable a la de los autobuses de combustión interna, además de exhibir cero emisiones locales que podrían ser totales si la electricidad que los recarga proviene de fuentes renovables.

El problema es que para optimizar la eficiencia y los costes del binomio vehículo-sistema de recarga, se deben analizar múltiples factores: longitud del recorrido, orografía del terreno, número y tiempo de las paradas, la infraestructura de recarga, las características de la red eléctrica, las tarifas eléctricas, etc. Por otro lado, y a pesar del creciente número de proyectos de BEBs, sigue faltando información sobre numerosos factores, entre los que destaca el rendimiento y la vida útil de las baterías en función de las características del autobús y de la estrategia de recarga empleada. También son necesarios más estudios sobre implementación de infraestructuras de recarga, especialmente para aplicaciones novedosas como las catenarias de larga distancia o los equipos de recarga inductiva.

En el artículo se presentan las principales estrategias de recarga de los BEBs y el hardware necesario para su implementación, y se analizan los puntos fuertes y débiles de las diferentes tecnologías de baterías en relación con su empleo en los mismos. El objetivo principal es mostrar cómo el uso de las nuevas tecnologías de baterías puede mejorar la eficiencia de las flotas de autobuses eléctricos, ayudando así a rediseñar el transporte público.

## II. ESTRATEGIAS DE RECARGA PARA AUTOBUSES ELÉCTRICOS CON BATERÍAS

El diseño del sistema de transporte público eléctrico con baterías debería hacerse optimizando las condiciones de servicio de las baterías (regímenes de carga y descarga, profundidad de descarga, temperatura de trabajo, etc.) dado que son el elemento más crítico y costoso del sistema. De esta forma se aseguraría, en primer lugar, que la batería va a exhibir las prestaciones iniciales previstas (potencia y energía) dotando al BEB de la aceleración, autonomía, etc. necesarias. En segundo lugar, se aseguraría que estas prestaciones se van a mantener dentro de los límites prefijados (por encima del 80% del valor inicial) durante el número de ciclos y años de servicio previstos, contribuyendo a amortizar la mayor inversión inicial que suponen los BEBs.

En este sentido, hay que tener en cuenta que el perfil de uso de la batería de un BEB se ve influenciado por numerosos factores como, por ejemplo: la orografía de la ciudad (potencia de descarga e importancia del frenado regenerativo), distancia de conducción (uso urbano/suburbano/designado) que fija la profundidad de la descarga, número y tiempo de las paradas (definirían la potencia y tiempo de recarga), el clima (temperatura de trabajo de las baterías, energía para alimentar la calefacción/sistema de refrigeración del interior del autobús), etc.

Sin embargo, a la hora de diseñar un sistema de transporte público eléctrico con baterías también influyen de manera decisiva otra serie de factores que suelen determinar la decisión final, como por ejemplo: preservar el patrimonio urbano y reducir el impacto visual (excluiría el empleo de cables aéreos y/o de pantógrafos), imposibilidad de proveer la potencia necesaria en los puntos de recarga (no se podría emplear carga rápida ni ultrarrápida si la infraestructura de red no es la adecuada o bien si los costes de inversión y/o explotación son demasiado elevados), garantizar la flexibilidad de las líneas (se excluye la recarga durante los trayectos al ser estos modificables) o garantizar la frecuencia de las líneas sin tener que incrementar el número de autobuses en circulación (el tiempo disponible de recarga y su distribución a lo largo del día determinaría la elección del tipo de recarga).

Todas estas consideraciones motivan que haya varias estrategias de recarga de los BEBs que, a su vez, van a condicionan el dimensionamiento del sistema de baterías y la elección de la tecnología de baterías más adecuada para su implementación.

### A. Carga lenta

La carga lenta requiere de unas 6 horas, lo que reduce el tiempo de disponibilidad del BEB, y de ahí que se realice usualmente de noche. Los BEBs deben contar con una batería grande, típicamente superior a los 200 kWh, que permita un rango de conducción de 100 a 250 km para cubrir el recorrido de un día completo. En cuanto a los cargadores empleados, trabajan con potencias típicas entre 40kW y 150kW; por tanto, las instalaciones de recarga son de media-baja potencia y no requieren de modificaciones en la infraestructura de red.

Esta estrategia da como resultado BEBs más pesados y caros (las baterías son más grandes) aunque los gastos de infraestructura son sensiblemente menores y, además, se aprovechan las tarifas eléctricas nocturnas, más reducidas. Resulta apropiada cuando el número de paradas o el tiempo de parada no permiten la recarga completa de la batería o en sistemas tarifarios como, por ejemplo, el español que penaliza la potencia contratada. Otra ventaja es que al realizarse la recarga en la propia cochera de los autobuses y no depender de cargadores situados en posiciones fijas, se consigue una flexibilidad total en cuanto al recorrido del autobús. Esta flexibilidad es muy apreciada en las ciudades, que deben buscar alternativas ante manifestaciones, obras viales o averías, pudiendo además modificar las rutas en momentos de alta demanda (por ejemplo, rutas escolares) [10].

Un ejemplo de implementación se encuentra en París (Francia). En 2018, Ile-de-France Mobilités y Group-RATP lanzaron una licitación para la compra de 1.000 BEBs de 12 metros con el fin de equipar dos líneas de autobuses y probar la carga parcial de baterías en las terminales [11]. Las marcas seleccionadas han sido Heuliez Bus, Bolloré y Alstom, y comenzarán a funcionar en 2020. Para minimizar el impacto en la red eléctrica la compañía ha optado finalmente por una carga lenta nocturna.

Dado que el requisito fundamental de los BEBs que emplean carga lenta nocturna es que sean capaces de ofrecer una amplia autonomía durante el día, lo que implica baterías grandes y costosas, es previsible que en el futuro asuman una cuota de mercado cada vez mayor a medida que los costes de las baterías van disminuyendo [12].

### B. Carga rápida o de oportunidad

Los BEBs que emplean carga rápida o de oportunidad minimizan el tamaño de la batería (peso y volumen, así como el coste) recargándola en las paradas y/o en los principios o fin de línea. De esta forma se consigue la autonomía deseada diaria con una batería de 50 a 150 kWh.

Sin embargo, el tiempo disponible de recarga es bajo por lo que se necesitan cargadores de alta potencia, realizándose la recarga habitualmente a través de pantógrafos. En este punto hay que destacar que el 60% de los BEBs pedidos en el último año están diseñados para el empleo de pantógrafos montados en el techo o en pórtico, siendo la solución más elegida por los operadores. La recarga puede hacerse en las paradas de autobús mientras los pasajeros embarcan o desembarcan (carga en ruta, hasta 600 kW durante unos 30 segundos) o en la cabecera y fin de línea (normalmente entre 150 kW y 500 kW) donde las paradas son más largas [13].

Las baterías más pequeñas permiten BEBs más ligeros y de menor coste, así como más eficientes en el sentido de que se reduce la energía que emplea el BEB para “transportar” la batería. Sin embargo, el tiempo disponible por parada en ruta es muy limitado y puede no ser suficiente para recargar la batería. Además, la carga rápida requiere mayores costes de inversión (cargadores de potencia elevada) y somete a mayor esfuerzo a la red eléctrica (alta demanda de energía en cortos periodos de tiempo) pudiendo requerirse incluso

modificaciones en la infraestructura de red cuando se trabaja con grandes flotas de autobuses.

También hay que tener en cuenta que sólo algunas tecnologías de baterías admiten carga rápida/ultrarrápida, reduciéndose considerablemente la vida útil de la batería si no se aplica adecuadamente (la sustitución prematura de la batería impediría la amortización de costes).

Entre los ejemplos recientes, citar que Irún ha introducido en 2019 [14], 4 BEBs de Vectia (filial de CAF) de 12 metros que cubren una línea de 12,5 km y 31 paradas con una frecuencia de 15 minutos. Se emplea un sistema de carga rápida (300 kW) mediante pantógrafo, con dos puntos de conexión al principio y fin de línea; cada recarga (4-5 minutos) permitiría un recorrido completo de ida y vuelta. En cuanto a las comunicaciones, el protocolo OppCharge es una interface abierta que posibilita que BEBs de diferentes marcas empleen los mismos puntos de recarga.

Un caso similar es el de Pamplona [15] (2019) con 6 BEBs del mismo modelo de Vectia (baterías de 44 kWh) que recorrerán una ruta de más de 6 km y cargarán sus baterías (potencia de carga, 300 kW) en 3 minutos, en dos puntos habilitados en los extremos de la línea.

Entre los ejemplos internacionales destaca Ámsterdam [16], en el área del aeropuerto de Schiphol, donde una flota de 100 BEBs del Grupo VDL dispone de 86 cargadores de 30 kW, así como de 23 cargadores rápidos (450 kW) que a través de pantógrafos recargan en 2-4 minutos. Se consigue así un funcionamiento continuo del BEB de hasta 22 horas (7 días de la semana) cubriendo un recorrido diario de entre 120km y 500km [17].

### C. Combinación de carga lenta con carga de oportunidad

En este caso, los BEBs combinan la carga lenta al final del servicio con la carga rápida en ruta. Un dimensionamiento correcto de las baterías en función de los requisitos de uso garantiza la máxima eficiencia energética y un menor estrés para la red eléctrica. Sin embargo, esta combinación implica mayores costes de inversión en infraestructura.

Como ejemplo, citar que Alstom está realizando pruebas con un prototipo de BEB con 200 km de autonomía, que incorpora un sistema de carga lenta (6 horas) y, además, un sistema de carga rápida (5 minutos) que puede implementarse mediante un pantógrafo o mediante un sistema de carga inductiva estática desarrollado por Alstom [18] [19].

### D. Carga en movimiento

La carga en movimiento (In Motion Charging, IMC) es un sistema que consiste en dotar al BEB de una batería pequeña (<50 kWh) que se carga a través de cables aéreos en tramos seleccionados de una ruta, a los que se conecta el BEB [20]. La potencia de carga es menor que la de carga rápida o de oportunidad, por lo que no resulta tan estresante para la red eléctrica. Por otra parte, la infraestructura es más barata que para un sistema tradicional de trolebuses debido a la menor cantidad de kilómetros de cable aéreo (menor impacto visual también).

Las baterías son más pequeñas, permitiendo que los autobuses sean ligeros y energéticamente eficientes, pero la problemática asociada a la instalación del cableado aéreo ha ralentizado la aplicación de esta estrategia en las ciudades.

### E. Cambio físico de las baterías

En este caso, las baterías se cambian cuando se agotan y se sustituyen por otras que han sido previamente cargadas en las estaciones designadas. La carga está programada, lo que permite cuidar mejor el estado de salud de las baterías. Además, es un sistema muy rápido, resulta menos estresante para la red eléctrica y permite reducir los costes de la electricidad al poder realizar la recarga en horas valle. Sin embargo, sólo es económicamente viable en algunos casos debido al coste añadido de las baterías de reserva y de la mano de obra.

En la Tabla 1 se resumen las principales estrategias de recarga, con sus ventajas e inconvenientes.

TABLA I

<b>Estrategia de recarga</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Carga lenta</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>_ Elevada autonomía</li> <li>_ Baja potencia contratada</li> <li>_ Flexibilidad en las rutas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>_ Autobuses más pesados y caros</li> <li>_ Limitada disponibilidad</li> </ul>
<b>Carga rápida o de oportunidad</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>_ Autobuses más ligeros y baratos</li> <li>_ Alta disponibilidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>_ Rutas restringidas</li> <li>_ Menor autonomía</li> <li>_ Mayores costes de infraestructura</li> </ul>
<b>Combinación lenta / oportunidad</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>_ Elevada autonomía</li> <li>_ Alta disponibilidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>_ Altos costes de infraestructura</li> </ul>
<b>Cambio físico de baterías</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>_ Rapidez</li> <li>_ Baja potencia contratada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>_ Alto coste (baterías de repuesto y mano de obra)</li> </ul>

### III. TIPOS DE CARGADORES EMPLEADOS EN AUTOBUSES ELÉCTRICOS CON BATERÍAS

Existen diferentes tecnologías de cargadores en base al hardware necesario que se debe colocar a bordo y/o en las paradas de autobús:

**Carga Inductiva:** La carga inductiva utiliza un dispositivo de carga instalado en el suelo, por lo que no tiene un impacto visual negativo en las ciudades. Técnicamente, este sistema tiene un rendimiento del 85-90 %, inferior a la carga de contacto. Además, los sistemas de carga inductiva sólo suministran potencias de entre 50 y 200 kW mientras que en carga conductiva se pueden alcanzar los 500 kW. En cambio, los sistemas inductivos son más seguros ya que sólo se inicia el proceso si hay un autobús presente en la zona de recarga.

Como ejemplo, indicar que en 2017 se puso en marcha en Madrid un proyecto piloto, una línea de autobús con 42 paradas, la primera línea de inducción eléctrica completa en España. El sistema utiliza cargadores de 8 minutos en las cabeceras de los itinerarios mientras que la recarga completa se realiza por la noche en las horas en que la línea no está en servicio [21].

**Carga Conductiva:** Las siguientes opciones corresponden a carga conductiva (un ejemplo de implementación de las mismas se puede apreciar en el portfolio de Siemens [22]). En estos casos, la instalación de la infraestructura (una tecnología más madura) es más económica que en el caso de la carga inductiva.

**Carga mediante conector (Plug-in):** Aunque el BEB puede disponer de un cargador en alterna (AC) interno, lo usual es que esté diseñado para recargar desde un equipo externo en continua (CC). La carga comienza automáticamente cuando el sistema se conecta al autobús y se ha identificado al usuario. A continuación, es el usuario el que controla el estado de carga de la batería y detiene manualmente el proceso cuando lo considera adecuado. El empleo de postes de carga en continua permite un posicionamiento flexible y garantiza la máxima eficiencia. El sistema puede diseñarse tanto para carga lenta como para carga rápida, pero normalmente se instala en los garajes para una carga lenta nocturna, disminuyendo el impacto en la red y los costes.

**Pantógrafo off-board top-down:** Es un sistema de carga rápida en CC que puede instalarse en un mástil o en el techo de una parada de autobús. Integra toda la electrónica de potencia, y el pantógrafo que se despliega hasta el techo del autobús; por tanto, permite BEBs más ligeros ya que sólo deben incorporar los raíles de contacto en el techo y el interface de comunicaciones. Todo el proceso de conexión y carga es totalmente automático. Otra ventaja es que se adapta a diferentes chasis de autobuses y diferentes tipos de red eléctrica (por ejemplo, conexión a redes de distribución de baja o media tensión). Entre las desventajas se encuentra el elevado coste de la infraestructura.

**Pantógrafo on-board down-top:** En este caso, todo el equipo de carga se instala en el BEB, incluido el pantógrafo que se despliega desde el techo del autobús hasta la zona de contacto en el mástil, lo que obliga a un posicionamiento más preciso.

Así, se simplifica la infraestructura de recarga (y se reduce su coste) mientras que se complica la estructura del BEB (más pesado y con menor espacio disponible para la batería, además de integrar los elementos móviles, lo que incrementa la posibilidad de averías y los costes de mantenimiento).

En el caso de BEBs que permiten la carga en movimiento, el pantógrafo se despliega hasta hacer contacto con la línea aérea, desde donde se realiza usualmente la carga en CC. Debido a problemas de calentamiento en los contactos, especialmente cuando se realiza la carga estática, suele establecerse una potencia máxima de carga de 100 kW [23].

### IV. TECNOLOGÍAS DE BATERÍAS PARA APLICACIONES DE AUTOBUSES ELÉCTRICOS

Es de suma importancia seleccionar la tecnología de almacenamiento de energía más adecuada para cada contexto operativo de los autobuses pues los parámetros de la batería (tamaño, vida útil, etc.) dependen de las condiciones de trabajo y, al mismo tiempo, influyen directamente en el coste y el rendimiento global del sistema.

Las baterías de litio-ion exhiben alta densidad de energía y potencia, lo que las convierte en la tecnología preferida para vehículos híbridos y totalmente eléctricos [24]. Junto con las características técnicas, la viabilidad económica es la característica clave para seleccionar una tecnología de baterías específica. El precio medio de las baterías de litio-ion en diciembre de 2017 era de 209 \$/kWh, con una reducción del 79% desde 2010 [12]. Además, se espera que los precios caigan por debajo de los 100 \$/kWh en 2025, alcanzándose la paridad de costes entre los vehículos de combustión interna y los vehículos eléctricos en la segunda mitad de la década de 2020.

La cuestión que se plantea es que existe una gran variedad de tecnologías de litio-ion, cada una de las cuales puede resultar más o menos indicada en función de las características específicas de la aplicación.

La tecnología LCO ( $\text{LiCoO}_2$ ) destaca por su capacidad específica teórica relativamente alta (274 mAh g<sup>-1</sup>), su capacidad volumétrica teórica elevada (1,363 mAh cm<sup>-3</sup>), su alta tensión de celda (3,6 V) y su baja autodescarga [25]. Las limitaciones de esta tecnología son su baja estabilidad térmica, su limitada respuesta cíclica, especialmente ante elevados regímenes de corriente de carga/descarga, y su alto coste debido fundamentalmente al cobalto. Por estas razones, LCO es la tecnología más utilizada en aplicaciones portátiles, donde el volumen y el peso de la batería son los parámetros más críticos. Sin embargo, no resulta adecuada para aplicaciones de movilidad eléctrica, donde la seguridad, la potencia, la admisión de carga rápida (y frenado regenerativo) y el coste, son parámetros determinantes.

Entre el resto de tecnologías de Li-ion con mayor implantación comercial, tres tecnologías (LFP, NMC y LTO) resultan prometedoras para su aplicación en autobuses eléctricos a baterías. A continuación se presentan sus principales características, que se resumen en la Tabla II [26].

TABLA II

Química	Energía Específica, (Wh kg <sup>-1</sup> )	Densidad de Energía, (Wh l <sup>-1</sup> )	Número de ciclos, 100% DoD	Corriente de descarga máx. (C-rate)	Tensión de celda (V)
LiCoO <sub>2</sub>	170–185	450–490	500	1 C	3,6
LiFePO <sub>4</sub> (EV/PHEV)	90–125	130–300	2000	5 C continua 10 C pulsos	3,2
NMC (EV/PHEV)	155–190	330–365	1500	1 C continua 5 C pulsos	3,7
LTO/NMC	65–100	118–200	12000	10 C continua 20 C pulsos	2,5

- LiFePO<sub>4</sub> (LFP)

Ha sido la tecnología comúnmente utilizada en los BEBs por sus características competitivas: elevada vida cíclica, buenos parámetros de potencia (admite descargas a regímenes elevados y carga rápida), alta estabilidad térmica (es la tecnología más segura entre las tecnologías de Litio-ion basadas en grafito) y precio competitivo (no emplea cobalto, un elemento caro). En cualquier caso, hay que tener en cuenta que la calidad de las celdas va a tener un impacto directo en las prestaciones finales del pack de baterías; así, el empleo de nanomateriales (A123 Systems) incrementa las prestaciones de esta tecnología de forma importante.

La mayor debilidad de la tecnología LFP es una tensión de celda más baja (3,2 V) y una energía específica comparativamente menor (90-120 Wh/kg) lo que resulta en baterías más grandes y pesadas. Además, la tecnología LFP presenta una mayor tasa de autodescarga. Diferentes fabricantes de BEBs emplean baterías de LFP, como por ejemplo BYD, Nova o Volvo.

- LiNiMnCoO<sub>2</sub> (NMC)

Esta tecnología se muestra prometedora para su empleo en los BEBs por su alta tensión de celda (3,7 V) y su elevada energía específica (150-200 Wh/kg) que contribuye, bien a obtener una batería más ligera, bien a conseguir mayor autonomía (para un tamaño y peso similar la capacidad es mayor). Sin embargo, la tecnología LFP es más segura que la tecnología NMC, y esta característica es de gran importancia ya que dado el tamaño del pack de baterías de un autobús, en caso de fallo podrían producirse fugas tóxicas e inflamables. Además, la tecnología NMC tiene una vida cíclica inferior a LFP, y contiene cobalto, por lo que resulta más cara. Aun así, el incremento de autonomía del vehículo está favoreciendo el impulso de esta tecnología; por ejemplo, algunos de los modelos de Proterra emplean baterías de NMC.

- Li<sub>4</sub>Ti<sub>5</sub>O<sub>12</sub> (LTO)

En esta tecnología se sustituye el electrodo de grafito que se emplea en las tecnologías tradicionales de litio-ion por un electrodo de titanato (en función del material del otro electrodo se habla de LTO/LFP, LTO/NMC, etc.).

Se consigue así en teoría dotar a las celdas de una vida de

miles de ciclos de carga/descarga, muy superior a los 2.000 ciclos que exhiben de promedio las celdas con electrodo de grafito [27]. Otra ventaja es que admitiría cargas y descargas a muy elevados regímenes de corriente, posibilitando la aplicación de cargas ultrarrápidas (disminución del tiempo de recarga) y frenado regenerativo (aumento de la eficiencia del autobús). Este tipo de procesos supone para la tecnología LFP un estrés si se realizan de forma continuada a regímenes muy elevados (especialmente si la celda no incluye nanomateriales) lo que aumenta la velocidad de degradación y reduce, por tanto la vida útil de la batería. En el caso de la tecnología NMC, todavía estarían más desaconsejadas estas combinaciones de cargas y descargas fuertes.

El electrodo LTO también aporta una excelente estabilidad térmica (es una tecnología más segura que las basadas en electrodo de grafito). Además, responde bien a temperaturas extremas, mejorando el rendimiento de las tecnologías de grafito a temperaturas muy bajas lo que resulta de gran utilidad para el arranque en climas fríos.

En cuanto a las principales desventajas, esta tecnología presenta una reducida tensión de celda (2,5 V) y los parámetros de capacidad teórica (175 mAh g<sup>-1</sup> y 600 mAh cm<sup>-3</sup>) y de energía específica (65-100 Wh/kg) son también inferiores a los de otras tecnologías de grafito, dando lugar a baterías más voluminosas y pesadas. Además, es una tecnología costosa debido al alto precio del Ti [12]. También hay que destacar que la calidad de las celdas es determinante en las prestaciones; de hecho, se observan grandes diferencias entre las características de diferentes fabricantes (margen de temperatura de recarga y de trabajo, regímenes de corriente de carga/descarga máximos, vida cíclica de servicio, etc.). Entre los BEBs que emplean baterías LTO se encuentran algunos modelos de las marcas Proterra y Vectia.

## V. CONCLUSIONES

Este artículo se centra en los desarrollos recientes y futuros de los autobuses eléctricos con baterías y su relación con la introducción en el mercado de las nuevas tecnologías de baterías de litio-ion. Aunque las flotas de autobuses se encuentran todavía en una fase incipiente en términos de aplicación pública, se están desarrollando múltiples proyectos

## REFERENCIAS

piloto a nivel mundial, en ciudades con características muy distintas (tamaño, orografía, clima, etc.). Se trata fundamentalmente de comprobar la eficiencia, flexibilidad, seguridad, coste, etc. del binomio autobús-sistema de recarga. Sin embargo, el resultado va a depender en gran medida de que la tecnología de baterías empleada se haya seleccionado adecuadamente: la batería debe responder a los requerimientos del vehículo y adecuarse a la estrategia de recarga.

Actualmente, las tecnologías de baterías más empleadas en los BEBs son LFP y LTO. La tecnología LFP, más madura y probada, se selecciona por su larga vida cíclica, buena respuesta en potencia, perfil de tensión plano, alta fiabilidad y seguridad, baja toxicidad y gran disponibilidad de materiales (este punto es importante para garantizar la producción futura a gran escala de las baterías). Dado que la tecnología LFP es sensible a los perfiles de uso agresivos, observándose en este caso una disminución de la vida útil de la batería, resulta indicada en carga lenta, semirrápida o rápida de forma ocasional, optándose por la tecnología LTO cuando se desean recargas ultrarrápidas y/o fuerte frenado regenerativo.

Aunque la tecnología LTO presenta valores inferiores de densidad de energía y energía específica, dando lugar a baterías más grandes y costosas (destacar también el mayor coste actual de la tecnología LTO), el hecho de admitir carga ultrarrápida y frenado regenerativo permite que el autobús pueda circular con una batería menor, lo que puede contrarrestar la desventaja inicial. En cualquier caso, hay que tener en cuenta que la infraestructura de la recarga de oportunidad es más compleja y costosa, que demanda unas características específicas de la red eléctrica, pudiendo llegar a requerirse inversiones importantes, y que puede tener un impacto visual negativo en la ciudad (empleo de pantógrafos).

Actualmente, China domina el mercado de los autobuses eléctricos (97% de producción) y de sus baterías (75% de producción) [28]. Hasta la actualidad, los fabricantes chinos han optado en mayor medida por la tecnología LFP, centrándose la fabricación de las tecnologías NMC y LTO en otras localizaciones a nivel mundial. Como se ha comentado, la tecnología LTO está ganando terreno en los últimos años para dar respuesta a las nuevas estrategias de recarga, aunque el desarrollo final va a depender en gran medida de la reducción de costes asociados (la implementación a gran escala generaría también importantes distorsiones en la red eléctrica). En cuanto a la tecnología NMC, se posiciona en Europa como una competidora para LFP; la idea es aumentar la autonomía de los vehículos y desplazar la producción de baterías fuera de China, aunque hay que tener en cuenta que sus niveles de seguridad y de vida de servicio siguen siendo inferiores a los de la tecnología LFP.

## AGRADECIMIENTOS

Este artículo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, FEDER y el Principado de Asturias a través de los Proyectos TEC2016-80700-R (AEI/FEDER, UE), TIN2017-84804-R, FC-IDI/2018/000226, y Programa Severo Ochoa de Ayudas Predoctorales (PA-18-PF-BP17-134).

- [1] European Environment Agency (EEA). "Exceedances of air quality limit values due to traffic, 2018". <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/exceedances-of-air-quality-objectives-7>
- [2] European Environment Agency (EEA). "Air quality in Europe – 2018 Report". ISSN 1977-8449. EEA Report No 12/2018
- [3] World Health Organization. "Ambient (outdoor) air quality and health, 2018". [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- [4] J. Lelieveld et al. "Cardiovascular disease burden from ambient air pollution in Europe reassessed using novel hazard ratio functions". *European Heart Journal*, 2019.
- [5] Richard Burnett et al. "Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter". *National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018.
- [6] European Environment Agency (EEA). "Electric vehicles from life cycle and circular economy perspectives. TERM 2018: Transport and Environment Reporting Mechanism". ISSN 1977-8449.
- [7] S. Schucht et al. "Moving towards ambitious climate policies: Monetised health benefits from improved air quality could offset mitigation costs in Europe". *Environmental Science & Policy*, 2015.
- [8] C40 Cities. <https://www.c40.org/other/fossil-fuel-free-streets-declaration>
- [9] Vrije Universiteit Brussel. MOBI. Electric driving: sparking your interest. <https://mobi.vub.ac.be/mobi/news/electric-driving-sparking-your-interest/>
- [10] Li, Shuhua & Li, Jun & Li, N & Gao, Ying. "Vehicle Cycle Analysis Comparison of Battery Electric Vehicle and Conventional Vehicle in China". *SAE Technical Paper 2013-01-2581*. 2013.
- [11] RATP, 2018. <https://www.ratp.fr/en/groupe-ratp/newsroom/bus/ile-de-france-mobilites-and-ratp-launch-biggest-tender-europe-buy-electric>
- [12] Bloomberg New Energy Finance (BNEF). "Lithium-ion Battery Cost and Market". BNEF Report. <https://data.bloomberglp.com/bnef/sites/14/2017/07/BNEF-Lithium-ion-battery-costs-and-market.pdf>
- [13] M. Rogge et al.. "Fast Charging Battery Buses for the Electrification of Urban Public Transport\_A Feasibility Study Focusing on Charging Infrastructure and Energy Storage Requirements". *Energies* 2015.
- [14] <https://movilidadelectrica.com/irun-autobuses-electricos-vectia/>
- [15] <https://www.diariodenavarra.es/noticias/navarra/pamplona-comarca/2018/07/19/linea-pamplona-sera-primera-100-electrica-navarra-601938-1002.html>
- [16] <https://www.electrive.com/2018/03/28/extra-large-13-mw-charge-depot-for-100-e-buses-live-in-amsterdam/>
- [17] <https://www.busandcoachbuyer.com/electric-avenue/>
- [18] <https://movilidadelectrica.com/aptis-alstom-emt-madrid/>
- [19] [https://www.abc.es/economia/abci-alstom-presenta-aptis-autobus-electrico-para-grandes-ciudades-201902061705\\_noticia.html](https://www.abc.es/economia/abci-alstom-presenta-aptis-autobus-electrico-para-grandes-ciudades-201902061705_noticia.html)
- [20] F. Bergk et al. "Potential of In-Motion Charging Buses for the Electrification of Urban Bus". *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, 2016. ISSN: 1792-9040 (print version).
- [21] EMT. (2017) <https://diario.madrid.es/blog/notas-de-prensa/emt-estrena-su-primera-linea-100-electrica-con-carga-por-induccion/>
- [22] Siemens eBus charging infrastructure. Innovative technologies and solutions for (e-)buses, 2017. <https://www.siemens.com/press/pool/de/events/2015/mobility/2015-06-uitp/presentation-ebus-e.pdf>
- [23] M. Bartłomiejczyk. "Practical application of in motion charging: Trolleybuses service on bus lines". 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), 2017.
- [24] N. Nitta, F. Wu et al. "Li-ion battery materials: present and future". *Materials Today*, 2015. DOI: 10.1016/j.mattod.2014.10.040
- [25] Aurelien Du Pasquier et al. "A comparative study of Li-ion battery, supercapacitor and nonaqueous asymmetric hybrid devices for automotive applications". *Journal of Power Sources*, 2003.
- [26] Peter Miller. "Automotive Lithium-Ion Batteries. State of the art and future developments in lithium-ion battery packs for passenger car applications". *Johnson Matthey Technology Review*, 2015.
- [27] K. Zaghbi et al. "Safe and fast-charging Li-ion battery with long shelf life for power applications". *Journal of Power Sources*, 2011.
- [28] ICEX (2019) <https://www.icex.es/icex/es/navegacion-principal/todos-nuestros-servicios/informacion-de-mercados/paises/navegacion-principal/el-mercado/estudios-informes/DOC2019819291.html?idPais=CN>