

Aplicaciones de los supercapacitores en autobuses urbanos

Alejandro Lois, PHD¹

¹Universidad Tecnológica Nacional, Argentina, alelois@hotmail.com

Resumen— Con el aumento de la demanda de energía y la necesidad de un desarrollo limpio y sostenible, el almacenamiento de energía y las tecnologías de conversión se han convertido en uno de los temas de mayor interés para las comunidades mundiales de ciencia y tecnología. Entre ellos, los dispositivos electroquímicos como baterías, pilas de combustible y supercapacitores son de especial importancia. Específicamente, los supercapacitores tienen varias ventajas, como carga rápida, gran número de ciclos de carga y descarga y un amplio rango de temperatura de operación, que han permitido una amplia aplicación en vehículos híbridos y eléctricos. Los supercapacitores han demostrado ser dispositivos muy útiles en los sistemas de transporte, ya que permiten diferentes grados de ahorro de energía en su operación, al tiempo que contribuyen a una menor emisión de gases de efecto invernadero. Por otro lado, la tracción eléctrica es la forma más eficiente y ecológica de transportar personas en el entorno urbano e interurbano. Hoy en día, la optimización del consumo de energía de los medios de transporte es una preocupación importante, por lo que los fabricantes de autobuses han comenzado a considerar las tecnologías de frenado regenerativo, que permiten que los vehículos utilicen la energía generada en las operaciones de frenado y la utilicen para otros fines, es decir, para satisfacer la demanda de energía a bordo e incluso proporcionar tracción. Este documento presenta una visión global de las estrategias y tecnologías actualmente disponibles para la recuperación y gestión de la energía de frenado en autobuses urbanos.

Palabras clave—Supercapacitores – Frenado regenerativo - Sistemas de almacenamiento de energía - Eficiencia energética.

I. INTRODUCCIÓN

Con el aumento de la demanda energética y la necesidad de un desarrollo limpio y sostenible, las tecnologías de almacenamiento y conversión de energía se han convertido en uno de los tópicos de mayor interés para las comunidades mundiales de la ciencia y la tecnología. Entre ellas, son de gran importancia los dispositivos electroquímicos tales como baterías, pilas de combustible, y supercapacitores electroquímicos (ES). En particular, el ES, también conocido como supercapacitor, ultracapacitor o supercondensador, tiene varias ventajas, tales como una carga rápida y ciclos largos de carga-descarga y un intervalo de temperatura de operación amplio, que han posibilitado que sean aplicados en vehículos híbridos y eléctricos. Sin embargo, todavía hay algunos problemas asociados a los sistemas de ES, como ser, la relativamente baja densidad de energía y su alto costo de fabricación [1].

Un capacitor convencional, también conocido como condensador o capacitor electrostático, es un dispositivo de almacenamiento de energía que consiste en dos placas conductoras de la electricidad (a veces llamados electrodos),

que están separados por una capa dieléctrica. Los materiales dieléctricos son aislantes, ejemplo de los cuales son la cerámica, el vidrio, el papel, el plástico, y el óxido de aluminio (Al₂O₃). El proceso de carga de los condensadores es simple. Cuando las dos placas conductoras están conectadas a una fuente de alimentación externa, que induce una diferencia de potencial entre ellas, en una de las placas se acumulan cargas positivas y en la otra se acumulan cargas negativas. Las cargas se mantienen en sus correspondientes placas, aun después de la desconexión de la fuente de alimentación externa; este es el estado de carga de un capacitor. Durante la descarga, el capacitor se descarga sobre una carga resistiva conectada, para de esta forma entregar su energía almacenada. Sin embargo, las aplicaciones para estos capacitores convencionales están limitadas por su baja capacidad de almacenar energía. Como resultado, la búsqueda de un nuevo material dio lugar a un nuevo tipo de capacitor llamado supercapacitor. A diferencia de los capacitores convencionales, los electrodos de los ESs se componen normalmente de materiales porosos de gran superficie, como los nanotubos de carbono (estructura de carbono con átomos en arreglo hexagonal dispuestos en un plano aislado de grafito, de forma tubular cilíndrica) y el separador puede ser sólido o líquido, generándose por lo tanto, las interfaces electrodo / electrolito. Estas interfaces, llamadas interfases eléctricas de doble capa, tienen una mayor superficie que los capacitores dieléctricos y por lo tanto pueden almacenar más carga (energía).

A. Historia

El primer supercapacitor fue patentado por el ingeniero eléctrico H. E. Becker para la General Electric en 1957 [1, 2], y se basaba en el principio de aumento del área de las placas sustituyendo la interfaz cerámica o polimérica entre las placas por un material poroso de carbono, utilizando ácido sulfúrico como electrolito, produciendo un sistema de doble capa, con un aumento importante en el área de las placas y, por tanto, en la capacidad.

El primer supercapacitor comercial lo patentó en 1966 y lo fabricó en 1970 Standard Oil of Ohio (SOHIO) [1, 2], con una interfaz de carbono y solución electrolítica de sal de tetralquilamonio. Estos supercapacitores tenían enormes problemas derivados de la enorme resistencia interna.

Pinnacle Research Institute (PRI) diseñó supercapacitores con baja resistencia interna para el uso como medio de almacenamiento portable de energía de alta potencia. En 1992, Maxwell Technologies se hizo cargo del desarrollo de PRI y

fabricó sus propios supercapacitores, llamados “Boost Caps.” [1].

Estos dispositivos generaron un gran interés debido a su aplicación a automóviles híbridos, por lo que se impulsó su investigación en todo el mundo. Actualmente, continúa la investigación en vehículos eléctricos y su uso en sistemas de energía solar y energía eólica. Los ES poseen ventajas que complementan las muchas deficiencias de otros dispositivos de almacenamiento de energía, por lo que han despertado gran interés académico y comercial. Los ES son capaces de proveer densidades de potencia más altas que las baterías y celdas de combustible y mayores densidades de energía que los capacitores convencionales. La Figura 1 muestra un diagrama de Ragone de potencia específica (potencia obtenida por kilogramo de masa del dispositivo) con respecto a la energía específica (energía almacenada por kilogramo de masa del dispositivo) de los dispositivos de almacenamiento de energía más comunes [2].

B. Importancia de los supercapacitores

Los ES poseen ventajas que complementan las muchas deficiencias de otros dispositivos de almacenamiento de energía, por lo que han despertado gran interés académico y comercial. Los ES son capaces de proveer densidades de potencia más altas que las baterías y celdas de combustible y mayores densidades de energía que los capacitores convencionales. La Figura 1 muestra un diagrama de Ragone de potencia específica (potencia obtenida por kilogramo de masa del dispositivo) con respecto a la energía específica (energía almacenada por kilogramo de masa del dispositivo) de los dispositivos de almacenamiento de energía más comunes [2].

En este gráfico, se puede observar que la tecnología del supercapacitor puede tender un puente en la brecha existente entre baterías y capacitores, en términos tanto de potencia específica como de energía específica. Además, otras características de los supercapacitores son la operación libre de mantenimiento, un ciclo de vida más largo que las baterías, su insensibilidad a la variación de la temperatura ambiente [3], la rapidez de carga y descarga, pueden proporcionar corrientes de carga altas (cosa que daña a las baterías) y por último, no presentan en su composición elementos tóxicos, muy común en baterías. Todos estos son atributos clave que hacen a los supercapacitores más atractivos y versátiles como dispositivos de almacenamiento de energía de alta potencia.

La principal desventaja de los supercapacitores es la limitada capacidad de almacenar energía, y al día de hoy, su mayor precio. En realidad debido a sus diferentes prestaciones, capacitores y baterías no son sistemas que rivalicen entre sí, sino más bien se pueden considerar en muchas aplicaciones como sistemas complementarios donde la batería aporta la energía mientras el supercapacitor aporta la potencia, por ejemplo, sistemas de distribución de potencia en circuitos

electrónicos y el frenado regenerativo en sistemas de transporte.

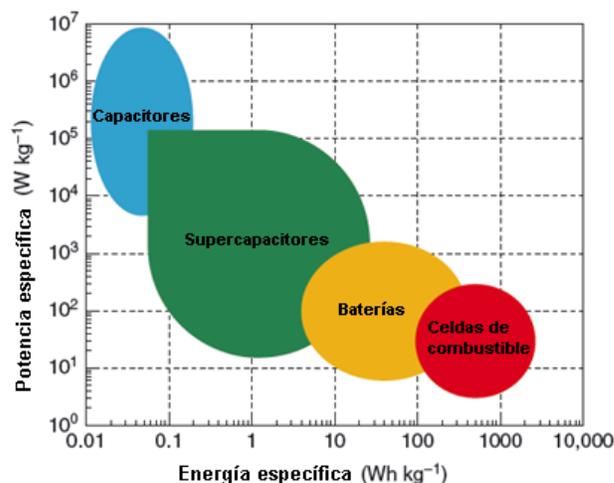


Fig. 1 Diagrama de Ragone de los principales dispositivos de almacenamiento de energía. Adaptado de [2].

II. SUPERCAPACITORES EN AUTOBUSES

Las primeras aplicaciones de supercapacitores en autobuses consistían en recuperar la energía de frenado, energía que se utilizaba posteriormente en el momento de arranque del motor diesel que impulsaba el vehículo. Hasta el momento, se han invertido considerables recursos en vehículos de pasajeros de baja emisión tanto para el transporte privado como público. Entre las soluciones factibles para aplicar en los sistemas de autobuses urbanos se encuentran los vehículos híbridos con un motor de combustión interna (ICE) y un motor eléctrico, los vehículos eléctricos alimentados por un supercondensador que se puede recargar en cada parada del autobús mientras la gente sube y baja, y los vehículos híbridos de pila de combustible (FCHV), que se caracterizan por el uso de hidrógeno como principal fuente de energía y un supercondensador, una batería o ambos como sistema de almacenamiento de energía (ESS). Todos estos tipos de autobuses tienen la capacidad de recuperar energía a través del frenado regenerativo.

A. Autobuses híbridos con motor de combustión interna

Los autobuses y camiones convencionales que se utilizan en un servicio con arranques y paradas frecuentes, como los autobuses de tránsito urbano y los camiones de reparto, utilizan enormes cantidades de combustible y producen altos niveles de emisiones tóxicas porque tienen motores grandes (generalmente diésel) que aceleran y deceleran constantemente, esto es, la forma menos eficiente de operar una fuente de energía.

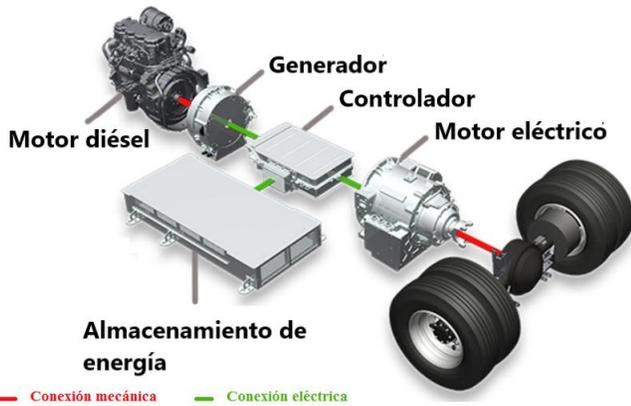


Fig. 2 Esquema del tren de potencia y sistema de almacenamiento de un bus híbrido serie. Adaptado de [4].

Con un sistema híbrido serie (ver Figura 2), la eficiencia del autobús se incrementa con el uso de un ICE más pequeño, acoplado a un generador eléctrico, que es operado a niveles constantes y eficientes de revoluciones y potencia. Cuando los requisitos de potencia del vehículo aumentan temporalmente, como durante la aceleración o el ascenso de pendientes, se extrae energía adicional de un sistema de almacenamiento de energía a bordo compuesto por baterías o ultracapacitores. Durante la desaceleración, el frenado regenerativo recupera la energía al mismo tiempo que ralentiza el vehículo y recarga el sistema de almacenamiento de energía. En otros momentos, cuando los requisitos de potencia del vehículo son bajos, el generador puede recargar el sistema de almacenamiento de energía.

En estas aplicaciones híbridas, las baterías crean muchos desafíos de diseño para los ingenieros automotrices:

1) las baterías necesitan un sistema de gestión de la temperatura para funcionar bien en climas extremadamente fríos o calientes.

2) las baterías requieren una gestión de ecualización de carga para evitar el fallo prematuro de las células.

3) las baterías tienen una vida útil limitada en condiciones de descarga profunda, lo que puede resultar en un reemplazo de alto costo durante toda la vida útil del vehículo.

Pero lo más importante es que las baterías son ineficientes para capturar energía rápidamente, y proporcionar ráfagas de alta potencia durante eventos de corta duración, como la aceleración y el frenado. Esta alta limitación de potencia reduce la eficiencia del diseño del sistema de accionamiento eléctrico híbrido. Debido a que los autobuses urbanos pasan la mayor parte del tiempo frenando o acelerando, la capacidad de capturar y regenerar la energía de frenado es vital, por lo que los desarrollos más eficientes emplean supercapacitores [5].

Con este sistema híbrido, la energía proviene de un generador que es impulsado por un motor de combustión interna. Los dispositivos de almacenamiento de energía, compuestos por supercapacitores, se utilizan para recuperar la energía de

frenado. La potencia del dispositivo de almacenamiento de energía se combina con el motor de tracción y la potencia del generador. La tecnología innovadora del convertidor y la gestión inteligente de la energía permiten reducir significativamente el consumo de combustible y las emisiones. El atractivo del vehículo aumenta aún más debido a que se reduce el ruido y se mejora el nivel de comodidad. Una función automática detiene el ICE y permite el funcionamiento con energía almacenada sin emisiones asociadas, por ejemplo, en zonas sensibles del centro de una ciudad.

La compañía de transporte VAG de Nuremberg, Alemania probó en 2001 el primer autobús con transmisión híbrida diésel-eléctrica que emplea supercondensadores en Europa. Fue el llamado "Ultracapbus" fabricado por MAN Nutzfahrzeuge AG y con tecnología de propulsión de Siemens AG, y se probó en funcionamiento real entre 2001 y 2002. El sistema de almacenamiento Ultracap estaba compuesto de 8 módulos, cada uno con 36 supercapacitores, funcionaba con 640 V y podía cargarse o descargarse a una corriente máxima de 400 A. Su capacidad de almacenar energía era de 0.4 kWh con un peso total de 400 kg. Los supercondensadores almacenaban la energía recuperada en el frenado, la cual se utilizaba para acelerar nuevamente el vehículo.

Las ventajas del sistema son:

- disminución significativa del consumo de combustible: 10 a 15% en comparación con los vehículos diésel convencionales,
- reducción de emisiones, particularmente CO₂,
- arranque silencioso y libre de emisiones del motor,
- menor vibración y
- menores costos de mantenimiento.

Como desventaja, el costo del vehículo es un 50% más alto que el de un autobús convencional.

El prototipo del actual MAN Lion's City Hybrid fue ampliamente probado en funcionamiento de prueba real por VAG de julio de 2007 a junio de 2008. Luego de la etapa de prueba, VAG puso este sistema en servicio diario en 2012. Tienen una alta confiabilidad técnica, pero el ahorro de combustible funcionó en solo 10-15%. Con el uso de la unidad híbrida, las emisiones de CO₂ directas se reducen proporcionalmente. Además, se pueden reducir otras emisiones, tales como partículas y óxidos de nitrógeno. Por lo tanto, la tecnología híbrida ayuda mucho a conservar recursos y mejorar la calidad del aire. El aumento de la comodidad de marcha en comparación con los autobuses diésel se encuentra entre los beneficios adicionales para los pasajeros. El accionamiento eléctrico no tiene cambios de marcha por engranajes, por lo tanto acelera suavemente y sin sacudidas repentinas.

El autobús híbrido MAN, que actualmente produce la empresa, consume hasta un 30% menos de combustible y ahorra hasta 10.000 litros de combustible diésel por año, un resultado que también se refleja en las emisiones de CO₂: el MAN Lion's City Hybrid contamina el medio ambiente hasta en 26

toneladas de CO₂ menos por año que los autobuses urbanos comparables con motorización convencional [6].

En Mayo de 2018, Alexander Dennis Limited (ADL) y BAE Systems entregaron los primeros 39 autobuses Enviro400H de dos pisos con tecnología híbrida Series-E, para equipar al cliente Go-Ahead London, que entraron en servicio en la ruta 36 de Transport for London entre Queen's Park y New Cross Gate. Realizan el almacenamiento de energía en ultracondensadores para reducir los costos de operación y mantenimiento durante su ciclo de vida. Este autobús híbrido de nueva generación ha logrado la certificación Ultra Low Emission Bus con un 37% menos de emisiones de gases de efecto invernadero que los autobuses diésel convencionales. El sistema de almacenamiento de energía en ultracondensadores reemplaza las baterías de la generación anterior. Diseñado para durar toda la vida útil del bus, este almacenamiento en ultracondensadores reducirá la inversión total al no requerir un reemplazo en la mitad de la vida útil del autobús. Debido a esto y otras mejoras, se predice una reducción del 53% en el costo de las piezas y los consumibles durante un período de diez años. A través de su mayor eficiencia, la tecnología híbrida Enviro400H con Series-E ha demostrado ser el mejor en su clase en economía de combustible en el ciclo de prueba "LowCVP's UK Bus", con un consumo de combustible un 6% más bajo que su predecesor. Las emisiones de CO₂ equivalentes, desde el tanque a las ruedas, de 684,9 g/km son un 37% más bajas que las de un autobús diésel Euro VI convencional, lo que hace del Enviro400H un autobús con emisiones ultra bajas [7].

ISE Corporation (San Diego, California) ha diseñado el módulo de almacenamiento ISE ThunderVolt ThunderPack II™, que equipa su autobús híbrido eléctrico, que actualmente circula en varias ciudades de los Estados Unidos, incluyendo Long Beach, Palm Springs, Oakland, Gardena, Elk Grove, San Bernardino, Montebello, New Jersey y Sacramento. Este sistema emplea supercapacitores HTM BOOSTCAP® desarrollados Maxwell Technologies. Un factor clave en el sistema de almacenamiento de energía es la gestión térmica. Con un enfriamiento eficiente, son posibles mayores corrientes en forma continua sin comprometer la confiabilidad. Las dimensiones y el diseño del módulo de 125 V se eligieron para una mejor eficiencia y comportamiento de enfriamiento cuando se opera a corrientes muy altas, de hasta 150 A continuos y picos de 750 A. Esto significa que se puede entregar una potencia de carga / descarga mucho mayor. El diseño del módulo garantiza que solo haya un aumento de temperatura de 3 ° C por encima de la temperatura ambiente máxima continua. Además de administrar alta corriente, el módulo está diseñado para soportar los entornos hostiles y los ciclos de trabajo extremadamente exigentes que son típicos de las aplicaciones de transporte pesado. El módulo está diseñado para funcionar de manera confiable durante un millón o más de ciclos de carga / descarga profundos, lo que equivale a 150000 horas o más de 15 años de vida útil. Su peso es menor

que 50 kg y el sistema ha funcionado de manera confiable a temperaturas de -25 °C a 45 °C [8].

Un autobús impulsado por un sistema de propulsión híbrido de gasolina y electricidad ThunderVolt completó con éxito una rigurosa prueba de 15000 millas de duración y seguridad realizada por la Administración Federal de Tránsito de Estados Unidos en Centro de Investigación y Pruebas de Altoona [9].

Daimler Buses debutó en el mundo con su gama de autobuses urbanos Citaro Hybrid bajo la marca Mercedes-Benz en la exposición 2017 Busworld Europe, en Bélgica. La compañía ha hecho opcional la tecnología híbrida para una amplia gama de autobuses Citaro equipados con motores diésel y de gas natural en diseños rígidos, articulados o de piso bajo. El híbrido Citaro combina una serie de tecnologías energéticamente eficientes para ahorrar combustible. Entre ellas está la recuperación de energía de frenado, mediante la cual el motor eléctrico que ayuda al motor de combustión interna actúa como un generador durante las fases de frenado y desaceleración. La energía así generada se almacena en supercondensadores, que son los más adecuados para picos de alta potencia y el cambio rápido entre carga y descarga durante los ciclos de arranque/parada en la operación típica del autobús urbano. Daimler ha colocado idealmente los supercondensadores de dos módulos (capacidad total de 2 Ah) que contienen 16 condensadores de doble capa en un lugar que ahorra espacio sobre el techo. Un inversor enfriado por agua convierte la CC en CA para impulsar el motor eléctrico. El sistema híbrido ofrece un consumo de combustible de hasta 8.5 % más bajo que el Citaro convencional con motor diésel [10].

El motor eléctrico del autobús híbrido Citaro ayuda al motor de combustión cuando se requieren altos niveles de potencia. No sirve para aumentar la potencia máxima; las cifras de salida y par para el bus permanecen sin cambios. En cambio, el motor eléctrico reduce la carga sobre el motor al tiempo que mejora las características de arranque del vehículo. Además de esto, un ligero efecto de impulso del motor eléctrico a velocidad de ralentí aumenta la eficiencia del motor de combustión. Estas dos funciones juntas se traducen en una reducción en el consumo de combustible.

Es suficiente frenar desde una velocidad de 50 km/h sólo una vez para recargar las unidades de almacenamiento de energía en el híbrido Citaro [11].

Siemens también ha incursionado en este mercado a través de los UCaps [12]. Estos son capacitores de alto rendimiento que se utilizan para almacenar energía para los vehículos híbridos con ciclos de tracción que se caracterizan por frecuentes arranques y paradas. Estos capacitores se cargan rápidamente especialmente durante el frenado y pueden descargarse nuevamente. Las ventajas de los UCaps en comparación con las baterías para vehículos híbridos son: la alta densidad de potencia, alta eficiencia y una vida útil del mismo orden que la del propio vehículo.

B. Autobuses eléctricos

Un vehículo eléctrico alimentado por un supercapacitor tiene de hecho un sistema de tracción eléctrico completo. Tales vehículos cubren distancias muy cortas entre paradas consecutivas, usualmente de menos de medio kilómetro [13]; por esta razón, el sistema de almacenamiento de energía (ESS) puede almacenar una baja cantidad de energía, pero debe proporcionar un alto pico de potencia. Por lo tanto, el ESS más apropiado está constituido por un supercondensador que es capaz de cargarse rápidamente durante las paradas de autobús. Si se consideran las peores condiciones operativas para el autobús (como ser un atasco de tránsito o una mayor distancia que cubrir), también hay que instalar una batería convencional.

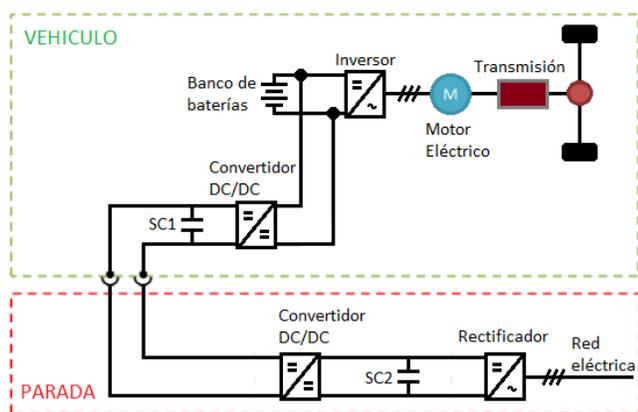


Fig. 3. Esquema del tren de potencia y sistema de almacenamiento de un bus eléctrico. Adaptado de [13].

El tren de potencia de un autobús eléctrico urbano puede representarse esquemáticamente como se muestra en la Figura 3; en la cual también se ha representado la estructura general de la estación de carga en la parada de autobús.

El sistema de almacenamiento de energía debe diseñarse para permitir que el autobús cubra la distancia entre dos paradas de autobús diferentes utilizando casi toda la energía de los supercondensadores; una vez que el vehículo se detiene en la parada del autobús, el banco de supercondensadores embarcados (SC1 en la Figura 5) se carga usando la energía almacenada en el banco de supercondensadores de la estación de carga (SC2 en la Figura 5) a través de un convertidor DC/DC de alta potencia (unos 100 kW) y un sistema de contacto móvil. Finalmente, la carga del banco SC2 está garantizada desde la red a través de un convertidor de CA/CC de menor potencia con el fin de tener cargas uniformes en la red de distribución de energía.

Los primeros autobuses que han adoptado esta tecnología, comenzaron a funcionar la década pasada. A partir de 2002 en Lucerna, Suiza, se sometió a prueba una flota de minibuses eléctricos llamada TOHYCO-Rider, que combina supercapacitores y la transferencia inductiva de energía,

prueba que fue superada demostrando la viabilidad de este diseño.

A raíz de los rápidos avances tecnológicos logrados en la producción de supercapacitores, con las consecuentes mejoras en sus características, el TOHYCO-Rider fue rediseñado completamente. La segunda generación de este minibus fue implementada y puesta a prueba en el verano de 2004. Los supercondensadores pueden recargarse con un cargador de potencia inductivo de alta velocidad sin contacto, a razón de 1,5 kW-h en casi 3 minutos, que posibilitan recorrer 3 km [14].

En la Figura 4 se puede ver el minibus TOHYCO-Rider en una de sus paradas. En frente del bus se puede ver la isla de carga por transferencia inductiva de energía.



Fig. 4. TOHYCO-Rider Bus. Adaptado de [14]

Entre los desarrollos más importantes, los autobuses Sinautec Ultracap [15], de cuarenta y un asientos, han estado en servicio en el área de Shanghai desde 2006. Estos autobuses almacenan energía eléctrica en ultracapacitores ubicados bajo el piso del autobús. Cuando el autobús se detiene en una parada, un pantógrafo rebatible se eleva y entra en contacto con las barras de carga permitiendo una rápida recarga (menos que 30 segundos) de los supercapacitores de a bordo para permitir que el autobús llegue a su próxima parada. El autobús Ultracap tiene una velocidad máxima de cerca de 50 km/h y un alcance entre recargas de 5,6 km, con el uso del aire acondicionado y de 9,6 km sin uso del a/a. El consumo de energía es de casi 1 kW-h por km recorrido. Los autobuses también pueden capturar energía del frenado, y la compañía dijo que las estaciones de recarga podrían estar equipadas con paneles solares. También afirmó que los autobuses usan un 40% menos de electricidad en comparación con un trolebús eléctrico, principalmente porque son más livianos y tienen los beneficios del frenado regenerativo. También son económicamente competitivos con los autobuses convencionales en función del ahorro de combustible durante los 12 años de vida útil del vehículo; según los precios de entonces del petróleo y la electricidad, Sinautec estimaba que

uno de sus autobuses gasta un décimo del costo de energía de un autobús diésel y puede lograr un ahorro de combustible durante su vida útil de 200.000 dólares [16].

La ciudad suiza de Ginebra comenzó una prueba piloto en 2013 con 12 autobuses eléctricos que utilizan un sistema de carga flash de alta potencia proporcionado por ABB. El sistema se denomina TOSA (Trolleybus Optimisation Système Alimentation- Sistema de Optimización de Alimentación del Trolebuses). Los autobuses eléctricos fueron construidos por el fabricante suizo HESS, utilizando varios componentes de ABB, incluidos convertidores integrados de tracción y auxiliares, unidades de batería montadas en el techo y sistemas de transferencia de energía y motores de tracción de imanes permanentes. ABB entregó 13 estaciones de carga flash, capaces de recargar las baterías en 15 segundos a razón de 600 kW, ubicadas a lo largo de la ruta del autobús, así como tres estaciones terminales y cuatro estaciones de depósito. El almacenamiento estacionario ubicado cerca de las estaciones de carga aplanan la demanda de energía eléctrica de la red, reduciendo la corriente requerida hasta 10 veces. Esto reduce el tamaño de la fuente de alimentación requerida y evita estresar la red. Una carga de 4 a 5 minutos a razón de 400 kW en el terminal recarga completamente las baterías. El cargador de terminal consta de un rectificador basado en IGBT que puede mantener el voltaje de salida al nivel deseado independientemente de las fluctuaciones en la red de CA. En el depósito se utiliza un tercer tipo de cargador, donde se aplica una carga más larga [17].

Inicialmente, ABB planeaba trabajar sólo con baterías como acumulador en sus autobuses, pero en 2014 se anunció el reemplazo parcial de estas por súpercapacitores, de tal manera de aprovechar las ventajas de ambos sistemas. La velocidad de carga se logra protegiendo la batería de ion-litio con un súpercapacitor, de tal manera que sólo es necesaria una batería de 40kWh, equivalente al almacenaje de dos automóviles eléctricos puros. No sólo permite economizar en la compra de la batería, sino que prolonga su vida útil hasta 10 años, por lo que debe cambiarse sólo una vez en la vida de 20 años de un autobús, algo que ciertamente no se logra con las baterías convencionales. El autobús funciona en un amplio rango de temperatura, entre -40 y +55 °C, mientras que las baterías de iones de litio pueden liberar muy poca energía a bajas temperaturas. Las baterías de plomo son aún peores [18].

Entre los beneficios obtenidos se cuentan una reducción de 1000 toneladas en las emisiones de CO₂ para un recorrido anual de 600000 km, transportando más que 10000 pasajeros por día y una reducción del nivel de ruido en 10 db comparado con un autobús diésel.

En la Figura 5 se puede ver una estación de carga TOSA. Se tarda menos de 1 segundo en conectar el autobús al punto de carga con un contacto superior de carga de alta potencia, cuando se detiene en paradas seleccionadas, recargando completamente sus baterías mientras los pasajeros suben y bajan.



Fig. 5. Estación de carga rápida TOSA de ABB. Extraído de [19]

Los autobuses eléctricos con súpercapacitores son muy comunes en China. La compañía china Sunwin, una empresa conjunta entre Volvo y el fabricante de automóviles más grande de China, SAIC, ya obtuvo un gran impacto publicitario en 2010, al proporcionar 61 autobuses eléctricos con súpercapacitores para servir en la Expo Mundial 2010 de Shanghai.

Los autobuses Sunwin con súpercapacitores tenían, en su versión 2010, una autonomía de 3 a 6 km. Los súpercapacitores se cargaban en cada parada de autobús con un pantógrafo (como el de un tranvía). 30 segundos son suficientes para cargar el autobús al 50% y se tardaba 80 segundos en cargarse al 100% [20].

Un nuevo autobús eléctrico se puso en funcionamiento el 28 de julio de 2015 en China. Su característica especial: una carga completa en sólo 10 segundos gracias a sus súpercapacitores. Este autobús recorre una línea de 11 km con 24 paradas en la ciudad de Ningbo en la costa este de China. En los siguientes tres años, no menos de 1,200 de estos autobuses se utilizarán para el transporte público en la ciudad, donde se encuentra la planta de autobuses eléctricos. El autobús se recarga en las estaciones de parada, mientras los pasajeros suben o bajan del autobús. Cada carga permite que el autobús viaje hasta 5 km. Además, consume de 30 a 50 % menos energía que otros vehículos eléctricos. Está equipado con súpercapacitores CSRCAP producidos por la compañía china "Ningbo CSR New Energy Technology", una subsidiaria de CSR Zhuzhou Electric Locomotive. Estos supercondensadores pueden operar 12 años y soportar más de un millón de cargas, incluso a altas temperaturas. Con un consumo de sólo una décima parte de la energía de un autobús diésel estándar, su rendimiento se traduce en un ahorro de combustible de hasta US\$ 200.000 durante toda la vida útil del vehículo [21].

A fines de 2016 comenzó la operación de prueba de cuatro autobuses eléctricos con supercondensadores de carga rápida en las líneas de autobús 34E y 50, de la ciudad de Graz,

Austria. Esas líneas han preparado un sistema que permite la carga rápida en paradas terminales, así como la carga ultra rápida en paradas intermedias. Esto es para garantizar que se puedan mantener los horarios, que están orientados a los autobuses diésel. La carga en las terminales toma aproximadamente de 3 a 5 minutos, la carga en las paradas intermedias de aproximadamente 30 segundos. Estas especificaciones solo se pueden cumplir con supercapacitores, dado que pueden cargarse en muy poco tiempo por las altas corrientes que soportan. La energía recuperada durante el frenado también se puede almacenar completamente en los supercapacitores. Dado que no se requiere recorrer grandes distancias con la carga realizada entre estaciones, el peso y el volumen del sistema de almacenamiento de energía es muy bajo, en comparación con las baterías, por lo que no reducen la capacidad de transportar personas de los autobuses. Los vehículos se han desarrollado en China por la empresa China Railway Rolling Stock Corp. (CRRC) y la empresa Chariot [22].

C. Autobuses híbridos con pila de combustible

Los limitados recursos de combustibles fósiles y las preocupaciones ambientales asociadas con la quema de esos combustibles fósiles subyacen al creciente interés en el hidrógeno como una alternativa limpia y sostenible a los combustibles fósiles, y en las pilas de combustible como un convertidor limpio de hidrógeno en energía eléctrica especialmente en el sector del transporte.

El primer autobús puro de pila de combustible (FCB), en China, se desarrolló en 2002, y tres FCBs han estado en servicio a prueba en Beijing desde 2008. Algunas desventajas propias de la tecnología de celdas de combustible, como el alto precio y la corta vida útil, influyeron en los procedimientos de comercialización. Para superar estos problemas, se han desarrollado autobuses híbridos incorporando la tecnología de regeneración de energía de frenado basada en supercapacitores, prolongándose la vida útil del sistema de pila de combustible y reduciéndose el consumo de hidrógeno [23].

Aunque los autobuses híbridos de pila de combustible (FCHB) aún no han entrado en la fase de comercialización a gran escala, tienen un gran potencial para ser el paso final en la transición del sector del transporte a vehículos ecológicos [24].

Los FCHB se caracterizan por el uso de un sistema de pila de combustible (FCS) como principal fuente de energía y un supercondensador, una batería o ambos como sistema de almacenamiento de energía (ESS). En comparación con los (FCB), con trenes de potencia FCS puros, la adición de un ESS para formar un tren motriz híbrido es ventajosa por las siguientes razones principales:

1) los FCS exhiben una dinámica lenta y tiempos de arranque largos; se necesita un ESS para mejorar la capacidad

de respuesta de la fuente de poder para cambios de carga abruptos durante la aceleración;

2) en el sistema híbrido, el ESS ayuda a cumplir con las demandas pico de potencia, por lo que el FCS necesita ser dimensionado de acuerdo con la demanda de cruce solamente, no a la demanda máxima como en trenes de potencia FCS puros;

3) el ESS mejora significativamente la economía de hidrógeno al restringir el funcionamiento del FCS a puntos de operación de alta eficiencia y al agregar la posibilidad de frenado regenerativo.

La durabilidad sigue siendo el principal desafío para la comercialización de pilas de combustible. La dinámica de carga se considera como el principal factor acelerador del envejecimiento [25]. El cambio de carga conduce a muchos efectos de degradación como la inundación de los medios porosos de los electrodos, la deshidratación de la membrana y la pérdida en la capa de catalizador debido a la falta de gas [26]. Como resultado, la dinámica de carga debe ser estabilizada para aumentar la vida útil del FCS.

La tasa de descarga de carga y la profundidad de descarga tienen también efectos importantes en la duración de las baterías. El envejecimiento de la batería se manifiesta en una disminución de la capacidad de descarga y un aumento en la resistencia interna [27].

Adicionalmente, en comparación con las baterías, los supercondensadores tienen una vida útil mucho más larga (~ 10^6 ciclos), tienen una potencia específica mucho más alta, pero con una energía específica significativamente menor. Como resultado, la combinación de las dos tecnologías, batería y supercondensador, conforma una solución ideal a sus limitaciones individuales, de modo que el ESS híbrido resultante tendrá una alta potencia específica y una alta energía específica.

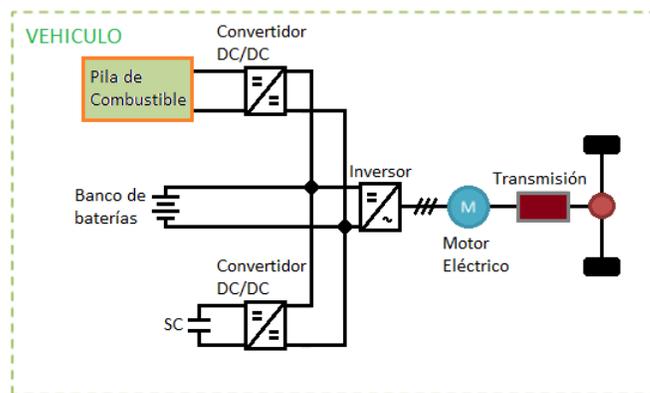


Fig. 6. Esquema del tren de potencia y sistema de almacenamiento de un bus FCHB. Adaptado de [29]

Además, con el supercondensador, la potencia de la batería se puede reducir significativamente prolongando su vida útil. La batería en un ESS con sólo baterías generalmente está

sobredimensionada para cumplir con los requisitos de potencia y duración en vehículos híbridos; por lo tanto, con la adición de un supercondensador, el tamaño de la batería puede reducirse significativamente. Debido a esta reducción en el tamaño de la batería, el análisis de costos de distintos ESSs ha demostrado que el ESS híbrido puede ser más económico que el ESS solo de baterías [28], y la ventaja de costos aumenta aún más si se tiene en cuenta el retardo en el envejecimiento de la batería [29].

En China se han llevado adelante proyectos de desarrollo de FCHB. En el informe final del Demonstration for Fuel-Cell Bus Commercialization in China (Phase II) [30], se indica que el uso de la recuperación de energía a través del frenado regenerativo con ultracondensadores ha dado como resultado un menor requerimiento de potencia, mayor vida útil de la pila de combustible y menor costo del autobús, como puede apreciarse en la Tabla I

Tabla I
MEJORAS OBTENIDAS POR EL USO DE SUPERCAPACITORES EN AUTOBUSES FABRICADOS EN CHINA

	2da Generación de FCHB	3ra Generación de FCHB
Potencia de la pila de combustible	80 kW	50 kW
Almacenamiento	80 Ah a 360 V en baterías	120 Ah a 336 V en baterías y supercapacitor
Duración de la pila de combustible	Menor que 2000 h	Mayor que 4000 h
Costo del vehículo	5.000.000 de RMB (yuanes)	2.600.000 de RMB (yuanes)

El fabricante de autobuses MAN, junto con su socio Air Liquide, construyó un FCHB con el apoyo financiero de la Comisión Europea. Este bus contaba con un sistema de propulsión eléctrica híbrida, que consistía de supercapacitores como dispositivo de almacenamiento. Se llevó a cabo una demostración de un año en Berlín (nueve meses), Copenhague y Lisboa, comenzando a mediados de 2002 en Berlín [31].

Por su parte, el proyecto europeo de autobuses de celdas de combustible Clean Hydrogen in European Cities (CHIC) publicó su informe final, en la International Zero Emission Bus Conference en Londres, Reino Unido, desarrollada entre el 30 de Noviembre y el 1 de Diciembre de 2016. El proyecto finalizó formalmente a fin de 2016 y ha demostrado que los autobuses con celdas de combustible pueden ofrecer una solución funcional para que las ciudades descarbonicen sus flotas de transporte público, mejoren la calidad del aire y reduzcan los niveles de ruido. CHIC, financiado a través de la Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU), ha sido un proyecto emblemático de seis años que desplegó una flota

de autobuses de celdas de combustible y estaciones de recarga de hidrógeno en ciudades de toda Europa y en un sitio en Canadá [32]. Entre la flota de autobuses desplegados por el Proyecto CHIC, se encuentran en funcionamiento 8 autobuses en Londres y 2 autobuses en Colonia que emplean sistemas de almacenamiento que incluyen supercapacitores [33].

Entre la flota de autobuses desplegados por el Proyecto CHIC, en Londres se encuentran en funcionamiento 8 autobuses fabricados por Wrightbus, que emplean una pila de combustible de 75 kW de potencia y un sistema de almacenamiento compuesto de supercapacitores que proporciona 105 kW adicionales con una capacidad de almacenamiento de energía de 20kWh; y en Colonia 2 autobuses fabricados por la compañía holandesa Advanced Public Transport Systems (APTS), que emplean una pila de combustible de 150 kW de potencia y un sistema de almacenamiento combinado de baterías y supercapacitores que proporciona 200 kW adicionales con una capacidad de almacenamiento de energía de 26kWh en baterías y 2 kWh en supercapacitores [34, 35].

La integración de ultracapacitores basados en grafeno en los autobuses de doble plataforma WrightBus permite un ahorro de combustible del 36% en comparación con una línea de autobús diesel EuroVI en funcionamiento en el Reino Unido. También agrega al menos otros 3 pasajeros a la capacidad de estos autobuses en comparación con un equivalente híbrido basado en baterías de litio. Con los supercapacitores los operadores de Wrightbus también están reduciendo los costos de mantenimiento. Mientras que la batería de litio puede durar alrededor de 4 a 5 años, los ultracondensadores funcionarán sin problemas durante al menos 7,5 años, con una vida útil estimada de 12 a 15 años [36].

II. CONCLUSIONES

Los súpercapacitores están demostrando ser dispositivos de gran utilidad en sistemas de transporte de personas y mercaderías, dado que posibilitan distintos grados de ahorro de energía en el funcionamiento de estos sistemas, a la vez que emiten una menor cantidad de gases de efecto invernadero.

Las investigaciones y desarrollos tecnológicos actuales, permitirán en un futuro próximo, disponer unidades de mayor capacidad y menor costo, que podrán emplearse en el reemplazo, cada vez mayor, de los vehículos con motores de combustión interna por vehículos de tracción eléctrica, ya sea en sistemas de tracción puros o híbridos.

Los desarrollos futuros incluyen el uso de carga inductiva debajo de la calle, para evitar el cableado aéreo. Se usaría una almohadilla debajo de cada parada de autobús y en cada semáforo en el camino.

Históricamente, se ha considerado que las baterías son el principal medio de almacenamiento de carga eléctrica para aplicaciones no conectadas a la red eléctrica. Si bien las baterías continúan cumpliendo este propósito, se espera que los súpercapacitores, desempeñen un papel fundamental en el

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

soporte de, o incluso en lugar de, el almacenamiento tradicional de baterías. La necesidad de los supercapacitores surge de varios frentes independientes, los más críticos son el manejo de energía y la sostenibilidad ambiental.

La transición de los motores de combustión interna que queman combustibles fósiles ha dejado un poco de espacio, entre las altas demandas de potencia de las aplicaciones de los motores de combustión y la potencia que la tecnología de la batería puede suministrar. Específicamente en los vehículos eléctricos actuales, el tamaño de la batería se determina frecuentemente por el requisito de manejo de potencia máxima, en lugar del rango mínimo que el vehículo debe ser capaz de realizar entre cargas, lo que hace que este componente del vehículo sea la parte individual más cara. Además, se sabe que la carga y descarga continua de alta potencia de las baterías reduce su vida útil de unos pocos miles de ciclos, a solo cientos. A la inversa, los supercapacitores son excelentes en el manejo de alta potencia, generalmente soportan cargas de energía hasta 100 veces más que las baterías de litio y, lo que es más importante, no dañan la unidad ni reducen su ciclo de vida, que generalmente se clasifica en un mínimo de 500,000 ciclos para los productos comerciales existentes.

Los supercapacitores de la generación actual carecen de alta densidad de energía, que también puede describirse como potencia sostenida durante largos períodos de tiempo. Como resultado, mejorar la densidad de energía del supercapacitor es un área de intensa investigación. Esta baja densidad de energía está limitando el rol actual de los supercapacitores en los vehículos, principalmente al soporte de potencia para sistemas como baterías y celdas de combustible que no pueden hacer frente a las demandas de potencia del frenado regenerativo y la aceleración fuerte. Además, la comparación de costos aparentes es un problema con los SC que llegan a 10,000 USD/kWh, en comparación con las baterías de litio, que ahora tienen un precio tan bajo como 250 USD/kWh.

A pesar de esta diferencia, la comparación directa de la métrica de almacenamiento eléctrico común de \$/kWh es engañosa cuando la potencia y no la energía, determina el tamaño de los paquetes de baterías. Está claro que existe un problema de optimización si se considera la unidad de medida de \$/kW, donde las baterías de litio son al menos diez veces más caras que los supercapacitores.

El aumento de la complejidad del problema se debe a factores técnicos como la mayor eficiencia eléctrica de los supercapacitores, su ciclo de vida muy superior y el ciclo de vida extendido de las baterías cuando se optimiza su carga. Además de los factores técnicos, factores sociales como la política de vehículos sin conductor y el desarrollo de infraestructura también tendrán un impacto significativo en el campo. Como tal, sigue habiendo una serie de desafíos sobresalientes en el desarrollo de soluciones óptimas para el suministro de energía a los vehículos eléctricos.

REFERENCIAS

- [1] Brian Kihun Kim, Serubbable Sy, Aiping Yu, Jinjun Zhang, "Electrochemical Supercapacitors for Energy Storage and Conversion". *Handbook of Clean Energy Systems*. Volumen 5, parte 5, pp. 2775-2800. 2015.
- [2] Kotz, R.; M. Carlen, "Principles and applications of electrochemical capacitors." *Electrochimica Acta* 45, pp. 2483-2498. 2000.
- [3] Tinton Dwi Atmajaa, Amina, "Energy storage system using battery and ultracapacitor on mobile charging station for electric vehicle". *Energy Procedia* 68, pp. 429 – 437. 2015
- [4] "Series-E: Electric power and propulsion", <http://www.hybridrive.com/series-e.php>. Recuperado el 09/11/2018
- [5] Maher, B., "Ultracapacitors Provide Cost and Energy Savings for Public Transportation Applications", *Battery Power Product & Technology*, Volume 10, issue 6, November/December 2006.
- [6] "MAN Lion's City Hybrid", <https://www.bus.man.eu/de/en/city-buses/man-lions-city-hybrid/overview/Overview.html>. Recuperado el 31/08/2018
- [7] "Go-Ahead London is first to operate next generation, ultra low emission hybrid bus from ADL and BAE Systems", <https://www.alexander-dennis.com/newsroom/news/2018/may/go-ahead-london-is-first-to-operate-next-generation-ultra-low-emission-hybrid-bus-from-adl-and-bae-systems/>. Recuperado el 07/09/2018
- [8] Adrian Schneuwly, "Energy storage for hybrid power in heavy transportation", White Paper Maxwell Technologies SA
- [9] Paul OShea, "Ultracapacitor successfully completes Federal Transit Administration durability test", https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1241636. Recuperado el 02/11/2018
- [10] Dhiyanesh Ravichandran, "Mercedes-Benz Citaro Hybrid with Supercapacitors – 2017 Busworld Europe", <http://wagenclub.com/2017/10/mercedes-benz-citaro-hybrid-with-supercapacitors-busworld-kortrijk.html>. Recuperado el 23/11/2018
- [11] "Daimler Buses introduces Citaro hybrid bus; available on diesel and gas models; separate 48V network", <https://www.greencarcongress.com/2017/10/20171019-citaro.html>. Recuperado el 26/02/2020
- [12] "ELFA: Zero emissions – the cost-effective and smart way Commercial vehicles go green!", <http://w3.siemens.com/topics/global/de/elektromobilitaet/PublishingImages/antriebe-pkw/pdf/commercial-vehicles-elfa-siemens-en.pdf>. Recuperado el 15/05/2016
- [13] F. L. Mapelli, D. Tarsitano, D. Annese, M. Sala and G. Bosia, "A study of urban electric bus with a fast charging energy storage system based on lithium battery and supercapacitors," 2013 Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), Monte Carlo, 2013, pp. 1-9.
- [14] V. V. Haeri and D. Martinovic, "Supercapacitor Module SAM for Hybrid Buses: an Advanced Energy Storage Specification based on Experiences with the TOHYCO-Rider Bus Project," IECON 2007 - 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Taipei, 2007, pp. 268-273.
- [15] "A sustainable solution for public transportation", <http://www.sinautecus.com/files/transportation.pdf>. Recuperado el 15/05/2016
- [16] Tyler Hamilton, "Next Stop: Ultracapacitor Buses", <https://www.technologyreview.com/s/415773/next-stop-ultracapacitor-buses/>. Recuperado el 25/07/2018
- [17] "A very different supercapacitor bus", <http://www.electricvehiclesresearch.com/articles/6974/a-very-different-supercapacitor-bus>. Recuperado el 15/05/2016
- [18] Charles Morris, "Geneva electric buses use ABB flash charging technology". <https://chargedevs.com/newswire/geneva-electric-buses-use-abb-flash-charging-technology/>. Recuperado el 15/05/2016
- [19] "ABB's innovative flash-charging technology goes live", <https://new.abb.com/news/detail/2694/ABBs-innovative-flash-charging-technology-goes-live>. Recuperado el 09/11/2018

- [20] “China takes the lead in adopting the all-electric bus equipped with supercapacitors”, <https://www.escomponents.com/blog/2017/10/11/china-takes-the-lead-in-adopting-the-all-electric-bus-equipped-with-supercapacitors>. Recuperado el 16/11/2018
- [21] Howe, Marc. (2015). “World’s Fastest Charging Electric Bus Debuts in China”. <http://gas2.org/2015/08/05/worlds-fastest-charging-electric-bus-debuts-china/>. Recuperado el 15/05/2016
- [22] Vier neue Elektrobusse für Graz <https://www.holding-graz.at/elektrobusse.html> 09/09/2019
- [23] Junzhi Zhang, Chen Lv, Mingzhe Qiu, Yutong Li, Dongsheng Sun, “Braking energy regeneration control of a fuel cell hybrid electric bus”, *Energy Conversion and Management*, vol. 76, pp. 1117–1124, 2013.
- [24] Farouk Odeim, Jürgen Roes, Angelika Heinzl. “Power Management Optimization of an Experimental Fuel Cell/Battery/Supercapacitor Hybrid System”, *Energies*, vol. 8, pp. 6302-6327, 2015.
- [25] Pei, P.; Chang, Q.; Tang, T. “A quick evaluating method for automotive fuel cell lifetime”. *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 33, pp. 3829–3836, 2008.
- [26] Pei, P.; Chen, H. “Main factors affecting the lifetime of Proton Exchange Membrane fuel cells in vehicle applications: A review”. *Appl. Energy*, vol. 125, pp. 60–75, 2014.
- [27] Broussely, M.; Biensan, P.; Bonhomme, F.; Blanchard, P.; Herreyre, S.; Nechev, K.; Staniewicz, R.J. “Main aging mechanisms in Li ion batteries”. *J. Power Sources*, vol. 146, pp. 90–96, 2005.
- [28] Bubna, P.; Advani, S.G.; Prasad, A.K. “Integration of batteries with ultracapacitors for a fuel cell hybrid transit bus”. *J. Power Sources*, vol. 199, pp. 360–366, 2012.
- [29] Hu, X.; Johannesson, L.; Murgovski, N.; Egardt, B. “Longevity-conscious dimensioning and power management of the hybrid energy storage system in a fuel cell hybrid electric bus”. *Appl. Energy*, vol. 137, pp. 913–924, 2015.
- [30] Marcial T. Ocampo, Tian Guangyu, “Demonstration for Fuel-Cell Bus Commercialization in China (Phase II). Final-Term Review Report”, 2011
- [31] Christian Gruber, Reinhold Wurster, “Hydrogen-fueled buses: the bavarian fuel cell bus project”, IEA Hydrogen, http://ieahydrogen.org/pdfs/Case-Studies/bavarian_proj.aspx. Recuperado el 26/11/2018
- [32] “CHIC European fuel cell bus project final report”, Fuel Cells Bulletin, Volume 2016, Issue 12, December 2016.
- [33] “Fuel cell electric buses: a proven zero-emission solution key facts, results, recommendations”, Informe final Proyecto Clean Hydrogen In european Cities 2010 – 2016
- [34] “Fuel cell buses: snapshot from the CHIC project and next steps. Presentation of emerging conclusions”, Forum Program Group Exhibit Hydrogen + Fuel Cells + Batteries HANNOVER MESSE 2015, https://www.h2fc-fair.com/hm15/images/forum/ppt/03wednesday/16_00.pdf. Recuperado el 26/11/2018
- [35] “Fuel cell electric buses: a proven zero-emission solution key facts, results, recommendations”, Informe final Proyecto Clean Hydrogen In European Cities 2010 – 2016
- [36] Olivier Chabilan, “Graphene-Based Ultracapacitors Boost Double and Single Decker-Buses Through Low Emission Zones by Reducing Fuel Consumption”, Skeleton Technologies Press, <https://www.skeletontech.com/news/graphene-based-ultracapacitors-boost-double-and-single-decker-buses-through-low-emission-zones-by-reducing-fuel-consumption>, Recuperado el 21/12/2018