
Modelado de sistemas de almacenamiento de energía en ferrocarriles

Modeling of energy storage systems in railways

Pablo Minayo Ferreruela¹

Resumen

Este artículo presenta un estudio del comportamiento de diferentes sistemas de almacenamiento de energía embarcados en un tranvía para una ruta real. Se procede a detallar, para dicha ruta, el consumo energético del tranvía, así como la influencia de las diferentes tecnologías en los sistemas de almacenamiento. Para éstos, se profundizará en las tecnologías de las baterías y supercondensadores (que son las más usadas en los proyectos actuales), y se elegirá un sistema de carga por inducción para el sistema de alimentación externo. Finalmente, se concluirán cuáles de los sistemas estudiados pueden servir para el propósito de eliminar la catenaria en todo el recorrido del tranvía y cuáles son las posibilidades para los distintos sistemas de almacenamiento.

Palabras clave: Tranvía, supercondensadores, baterías, catenaria, energía, potencia.

Abstract

This article is focused on the study of the behavior of different on-board energy storage systems in the case of a real track of a tram. It will be detailed, for that track, the energy consumption of the tram, as well as the influence of different technologies in storage systems. Within these technologies, it will be deepened in batteries and supercapacitors as energy storage (which are the most used in nowadays projects), and it will be chosen a wireless inductive charging system. Finally, it will be concluded which of the studied systems are suitable for the purpose of eliminating the catenary in all the track of the tram and the possibilities for these energy storage systems.

Keywords: Tram, supercapacitors, batteries, catenary, energy, power.

¹ Pablo Minayo Ferreruela. Grado en Ingeniería Electromecánica. Máster en Ingeniería Industrial en la Universidad Pontificia de Comillas, ICAI. Actualmente se encuentra estudiando Master in Business Administration, ICADE Business School. Ha hecho prácticas como ingeniero de mantenimiento de material ferroviario en Talgo. Desde 2017, forma parte de la plantilla de la empresa Aecom en el departamento de Sistemas Ferroviarios.

1. Introducción

Actualmente, el creciente consumo de energía por parte de la humanidad, junto con el agotamiento de los recursos fósiles, hacen necesario tanto encontrar nuevas fuentes de energía como aprovechar y hacer un uso más eficiente de ella. El transporte representa un campo muy importante en lo que a consumo de energía se refiere, por lo que es vital utilizar ésta de manera eficiente y tratar de optimizar su uso en este campo. Por otra parte, el hecho de que los medios de transporte ferroviarios dispongan, en el caso de la tracción eléctrica, de una fuente externa de alimentación continua hace que éstos puedan recibir constantemente energía. Por ello en este grupo es más oportuno plantearse reducir el consumo energético, mejorando así la eficiencia del sistema.

Dentro de los medios de transporte ferroviarios, este artículo se centra en el tranvía, modo eminentemente urbano y en clara expansión, con evidentes ventajas respecto al metro ya que su infraestructura no es tan costosa, al poder circular por la superficie.

No obstante, uno de los principales problemas que plantea el tranvía tiene que ver con la contaminación visual, debido al cableado a lo largo de todo su recorrido. Por ello numerosos proyectos actuales han desarrollado tecnologías para intentar eliminar el cable aéreo que alimenta al tranvía, llamado catenaria.

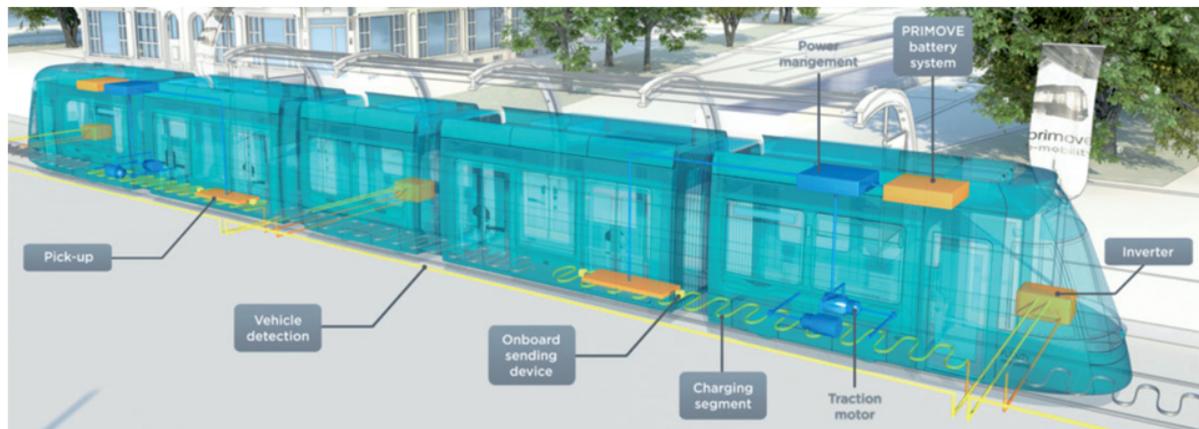
Se elegirá por tanto un sistema de almacenamiento, y, en caso de que fuese necesario, de alimentación, que permita sustituir totalmente a la catenaria. Además, también se abordará, una vez elegido el sistema de almacenamiento, su modelado, dimensionamiento y la verificación teórica de su funcionalidad. Entre los sistemas de almacenamiento capaces de sustituir o complementar al sistema de alimentación externo, las baterías y supercondensadores, en cuanto a tecnologías embarcadas en el tranvía, son las que se han demostrado más eficaces, como se concluye en los numerosos proyectos que actualmente los están investigando.

Las baterías son los acumuladores de energía tradicionales y los más usados en la actualidad, dadas las buenas prestaciones de almacenamiento que se han alcanzado gracias a un constante estudio y desarrollo de sus características. La alta densidad de energía y el bajo coste hacen que sean una solución usada actualmente para los tranvías. El inconveniente principal de las baterías es la baja densidad de potencia que poseen junto con su baja durabilidad, dado que, al soportar reacciones químicas en su interior, se deterioran de una manera rápida.

Los supercondensadores, también llamados ultracondensadores, son, en el momento actual, la novedad en lo que a almacenamiento de energía se refiere. El tipo de supercondensador más común hoy en día es el condensador electroquímico de doble capa (EDLC). Su modo de funcionamiento le permite trabajar sin reacciones químicas parasitarias en su interior, siendo el almacenamiento de carga puramente electrostático, lo que permite aumentar considerablemente su vida útil, una de las ventajas más importantes frente a las baterías. Su característica fundamental reside en la elevada densidad de potencia que poseen, lo cual hace que sean idóneos para los tranvías, ya que necesitan que en periodos cortos de tiempo se transmitan cantidades de potencia elevadas.

Para el sistema de alimentación externa se ha elegido el de carga por inducción o transmisión de energía inductiva de alta potencia por aire, un sistema enterrado en el suelo que permite reducir todo el impacto visual que la catenaria implica. Este sistema se caracteriza por la transmisión de energía a través del aire, por lo que no existe superficie de contacto entre tranvía y vía. Esto supone una de las ventajas principales de este sistema, ya que no se produce rozamiento entre superficies dado que el contacto es nulo, por lo que el mantenimiento es menor que en otras tecnologías sustitutivas de la catenaria. En la Figura 1 se puede observar el esquema completo de este sistema incluyendo al propio tranvía. El tranvía lleva incorporados unos sensores que detectan cuándo está en una zona de carga, activando las bobinas receptoras y disponiendo al tranvía para su alimentación.

Figura 1. Sistema completo Bombardier Primove



Fuente: Proyecto Primove Bombardier. Applications: Tram.

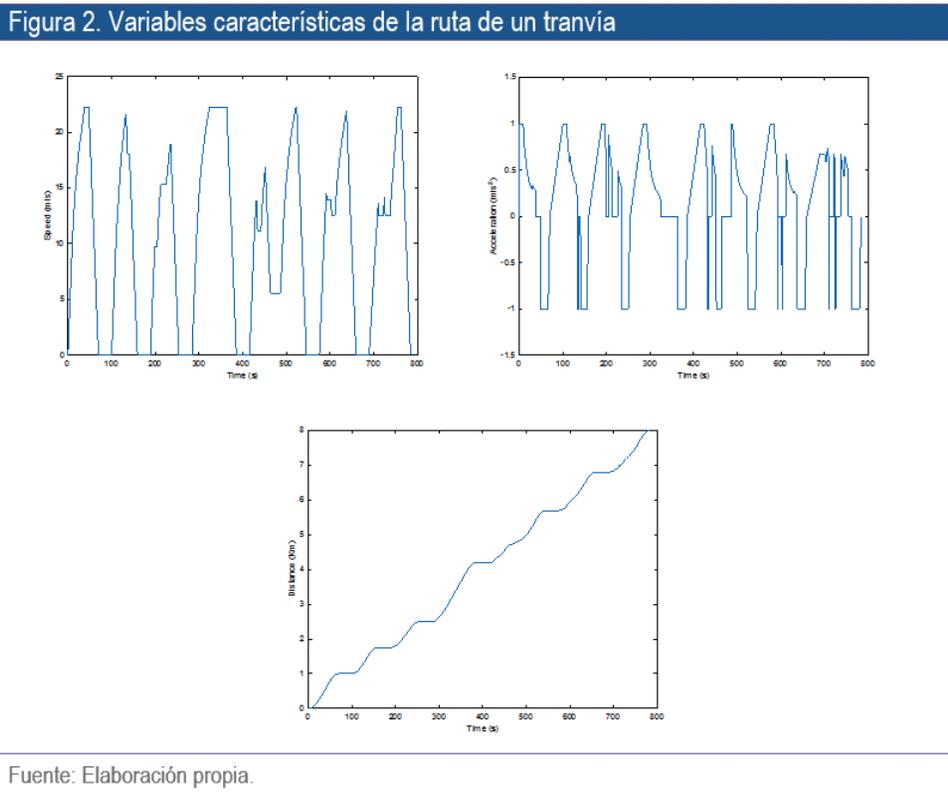
No obstante, se ha intentado desarrollar un sistema embarcado que permita minimizar la presencia del sistema de alimentación externo: debido a las ventajas de los supercondensadores y baterías, se ha considerado que éstos, de manera individual o combinada, pueden ser una solución interesante para ello, consiguiendo además hacer un uso más eficiente de la energía.

2. Metodología

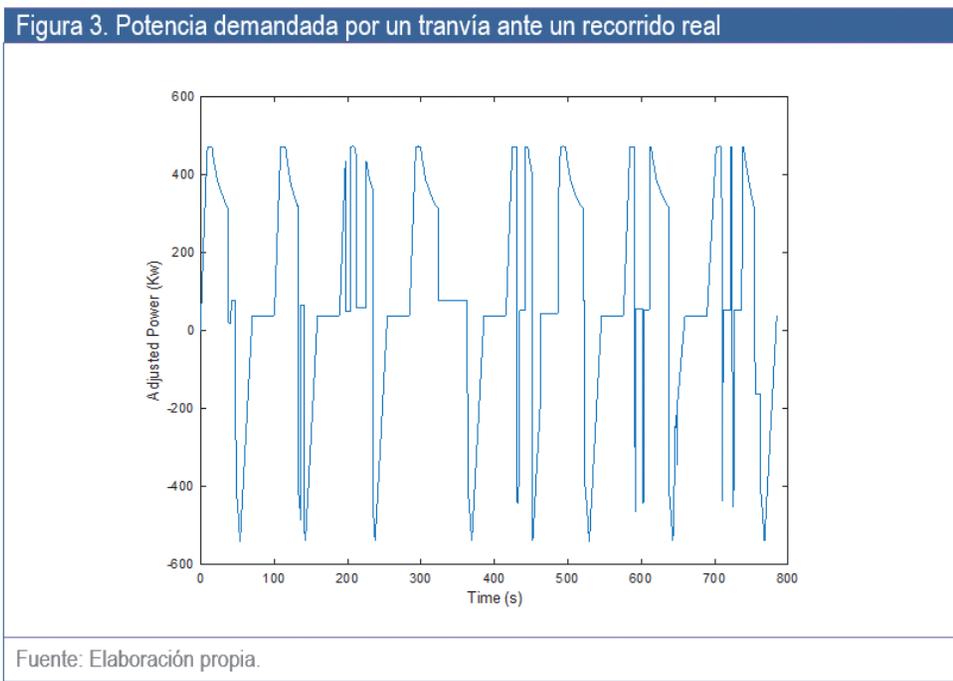
Para dimensionar el sistema de almacenamiento que debe ir embarcado en el tranvía, se ha establecido una estrategia que permita recuperar toda la energía generada en el frenado. Una vez que se ha dimensionado, se ha comprobado que dicha energía era recuperada totalmente; no obstante, el sistema de almacenamiento no era capaz de alimentar al tranvía en todo su recorrido o al menos en su mayor parte. Como lo que se pretende es reducir la energía entregada por el sistema de alimentación externo, se ha probado de manera experimental un sistema de almacenamiento que permita tal cosa, siempre que no se superen los límites de masa y dimensiones máximas aceptadas por el tranvía.

Por lo tanto, es necesario definir y diseñar qué sistemas y configuraciones pueden servir para tal meta y comprobar si, ante una situación real, éstos pueden responder de la manera deseada. Una vez que se haya diseñado el sistema de almacenamiento, se establecerá su estrategia de funcionamiento en tres modos distintos. Después de haber definido el modo de actuación, para poder testar el comportamiento del sistema de almacenamiento, se diseñará un recorrido teórico, con sus variables características (tiempo, velocidad y aceleración) para un tranvía estándar. Con ello, se calcularán los datos de entrada para poder analizar el comportamiento de los distintos sistemas de almacenamiento. Cuando el sistema de almacenamiento se ajuste al comportamiento requerido, se probará en la ruta real de un tranvía, con más paradas intermedias, para poder dar un carácter práctico y exigir al sistema de manera realista la potencia demandada por un tranvía.

En las siguientes figuras se pueden observar las variables características del recorrido real usado en las simulaciones. Las gráficas de velocidad, aceleración y distancia, como se puede observar en la Figura 2 (en cuyos respectivos ejes de ordenadas se muestran estas variables, y en los de abscisas el tiempo en segundos), son para un recorrido con 7 paradas intermedias de unos 30 segundos por parada. La duración total del recorrido es de alrededor de 13 minutos y la distancia cubierta de 8 kilómetros.



En la Figura 3 se puede observar la potencia demandada por el tranvía para las gráficas mostradas anteriormente. Se puede observar cómo la potencia nunca se mantiene constante en 0 MW, a pesar de las paradas que tiene el tranvía. Esto se debe al consumo de los equipos auxiliares, que, aun estando éste parado, siguen consumiendo energía.



En cuanto al sistema de almacenamiento, como se ha indicado, se establecerán tres modos de funcionamiento: el modo estándar se basará en entregar la potencia demandada por el tranvía en cada momento; el modo impulso en entregar una potencia constante, devolviendo en ciertos tramos potencia a la red, requiriendo por lo tanto de un sistema de alimentación externa continuo; y el modo CFO (catenary free operation) en entregar la potencia demandada por el tranvía sin cargar en las estaciones, sólo cargando en tramos de deceleración. En todos los modos se dispone de frenado regenerativo, a través del cual se cargará el sistema de almacenamiento en las fases de aceleración negativa.

Los valores característicos y dimensiones tanto del tranvía como del sistema de almacenamiento para las distintas tecnologías se pueden observar en la Tabla 1.

Tabla 1. Variables características del sistema simulado

Variable	Valor	Unidades
Variables genéricas		
Masa tranvía	51980	kg
Eficiencia del sistema de tracción	0.9	-
Eficiencia del convertidor DC-DC	0.95	-
Superficie frontal del tranvía	8.3	m ²
Densidad del aire	1.225	kg / m ³
Coefficiente de arrastre	0.82	-
Variables caso sólo supercondensadores		
Capacidad interna supercondensadores	189	F
Resistencia interna supercondensadores	0.0006	Ω
Masa supercondensadores	3043.2	kg
Tensión nominal supercondensadores	500	V
Eficiencia de carga	0.95	-
Potencia máxima de carga	900	kW
Variables caso sólo baterías		
Masa baterías	3000	kg
Contenido de energía máxima	147	kWh
Corriente máxima de descarga por unidad	120	A
Tensión nominal	532	V
Eficiencia de carga	0.9	-
Potencia total máxima de carga	383.04	kW
Variables caso mixto		
Masa baterías	1000	kg
Contenido de energía máxima baterías	49	kWh
Corriente máxima de descarga por batería	120	A
Tensión nominal de las baterías	532	V
Eficiencia de carga de las baterías	0.9	-
Potencia total máxima de carga de las baterías	120	kW
Capacidad interna supercondensadores	126	F
Resistencia interna supercondensadores	0.0009	Ω
Masa supercondensadores	2028.8	kg
Tensión nominal supercondensadores	500	V
Eficiencia de carga	0.95	-
Potencia máxima de carga	900	kW

Fuente: Elaboración propia

Es importante destacar que el límite operativo inferior de los distintos sistemas de almacenamiento se fijó en distintos valores, según las características de las tecnologías. Así, en el caso de los supercondensadores se fijó que operasen de manera correcta entre un estado de carga del 100% y del 16%. En el caso de las baterías, este rango es menor dadas las características técnicas de éstas, siendo éste de entre el 100% y el 40%.

3. Resultados

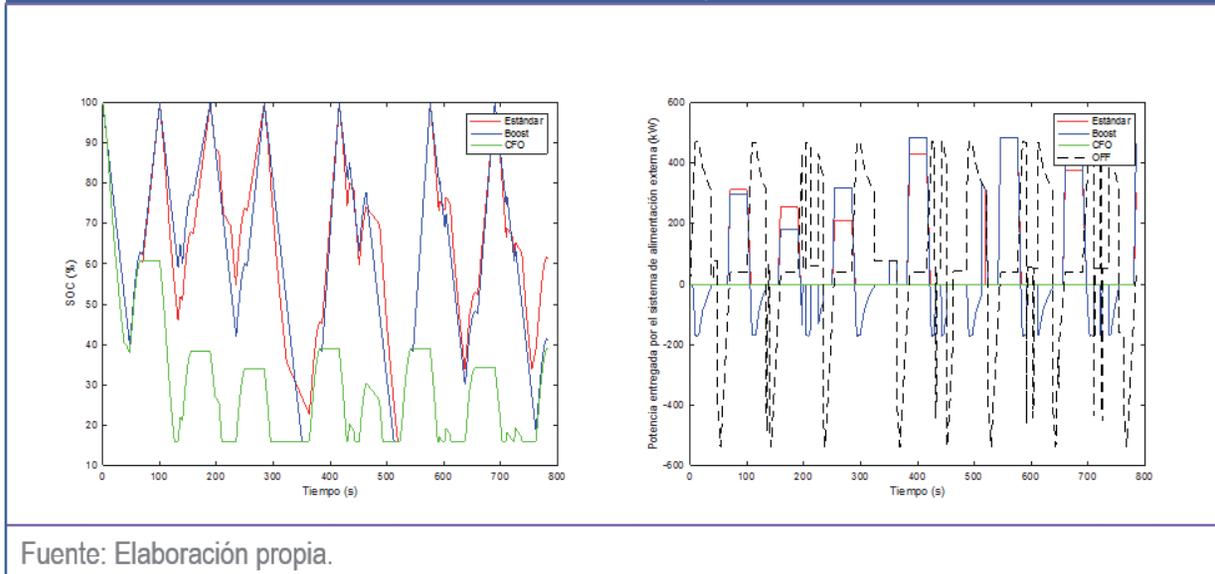
En esta sección, para no alargar demasiado este Artículo, no se muestran todas las configuraciones y recorridos (teóricos y reales) que se desarrollaron en el proyecto; se recogen varias configuraciones del sistema de almacenamiento y sólo los datos correspondientes a los recorridos reales. A su vez, en el proyecto, y dados los limitados resultados que se obtuvieron en el recorrido teórico para el caso de un sistema de almacenamiento formado exclusivamente por baterías, no se trabajó con el recorrido real.

Para todas las figuras de este apartado se ha usado la notación de N y M para especificar el número de unidades en serie y en paralelo del sistema de almacenamiento. En caso de que se trate del sistema mixto, es decir, supercondensadores y baterías a la vez, N y M se aplica a los supercondensadores y NN y MM a las baterías.

En la parte izquierda de la Figura 4 se muestra el estado de carga (SOC: state of charge) del sistema formado por supercondensadores para el caso del trayecto real del tranvía. Se puede observar cómo para los modos estándar e impulso (boost en la figura) el sistema se comporta según lo requerido, sólo llegando a niveles de mínima energía en dos momentos puntuales, recuperándose al poco tiempo. No se puede decir lo mismo del modo CFO, pues no llega a suministrar la potencia requerida por el tranvía al llegar constantemente a niveles de mínima energía, alcanzando el nivel de carga en este modo continuamente valores mínimos (16%) entre paradas, haciendo imposible su funcionamiento independiente. Esto implica que el tranvía necesita por lo menos carga en la estación y que no puede eliminarse la alimentación externa en todo el recorrido. A la vez, resulta esperanzador ver que sólo con la potencia de carga en las estaciones, el sistema en los modos impulso y estándar puede responder perfectamente y no necesitar de alimentación externa en casi todo su recorrido.

En la parte derecha de la Figura 4 se puede observar la potencia entregada por el sistema de alimentación externa para esta simulación. En el modo estándar sólo es distinta de 0 en los tiempos de parada en las estaciones durante todo el recorrido, así como alrededor de los 520 segundos de la simulación, tiempo en el que el sistema de almacenamiento llega a su nivel de energía mínima y por lo tanto necesita ayuda adicional del sistema de carga por inducción. El modo impulso se comporta de manera distinta, pues al entregar una potencia más alta que la requerida por el tranvía en ciertos tramos, el sistema de almacenamiento devuelve potencia a la red que puede ser aprovechada por otros tranvías o incluso almacenada para su uso posterior. Al igual que ocurre con el modo estándar, en un tiempo de 510 segundos aproximadamente, el sistema de almacenamiento llega a su energía mínima por lo que requiere igualmente potencia del sistema de alimentación externa. En el modo CFO, la potencia entregada por el sistema de carga por inducción es 0 en todo su recorrido, al no haber tal sistema, mostrando que sólo con supercondensadores el tranvía, en este modo, no puede funcionar correctamente. Por último, en la gráfica de la derecha, el modo Off muestra la potencia entregada por la alimentación externa en el caso de no contar con ningún tipo de sistema de almacenamiento. Con ello se puede observar de manera clara el ahorro de potencia a entregar al contar con esta tecnología.

Figura 4. Estado de carga del sistema de supercondensadores y potencia entregada por el sistema de alimentación externa. Caso real: N=4, M=12

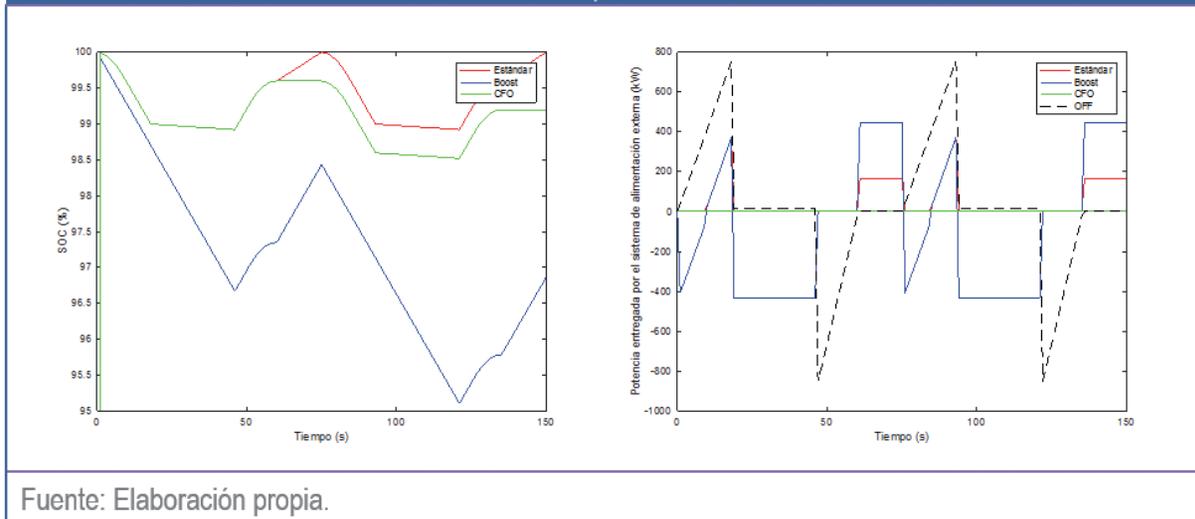


En el caso de las baterías, en la parte izquierda de la Figura 5 se puede observar su estado de carga para la ruta teórica. Éste no llega a bajar del 95% en ninguno de los modos, por lo que queda comprobado que hay energía disponible para alimentar al tranvía en todo su recorrido. También es interesante apreciar cómo en el modo impulso las baterías no llegan a cargarse hasta su punto de energía máxima después de cada parada, pues sólo alcanzan un 98.5% del estado de carga máximo debido a la limitación de potencia de carga existente. A pesar de ello, la limitación de la potencia que existe en el modo de las baterías, más restrictiva que en el modo de los supercondensadores, hace que el sistema de alimentación externa deba complementar a las baterías en gran parte del recorrido, tal y como se muestra en la parte derecha de la Figura 5. Este, el principal problema de las baterías, que no pueden entregar la potencia necesaria, llegando al límite demasiado pronto y no pudiendo alimentar por sí solas al tranvía durante todo su recorrido.

Como se ha mencionado, en la parte derecha de la Figura 5 se muestra la potencia entregada por el sistema de alimentación externo para el caso de las baterías. Se puede observar cómo en el modo estándar y en el modo impulso la potencia máxima a entregar por el sistema de alimentación externa se reduce de casi 800 kW a menos de la mitad, lo cual supone un ahorro en potencia instalada del sistema de alimentación externo.

En el modo impulso la potencia entregada por el sistema de almacenamiento al sistema de alimentación externo es considerablemente alta en parte del recorrido, la cual puede ser aprovechada por otros tranvías que se encuentren en fase de aceleración.

Figura 5. Estado de carga del sistema de baterías y potencia entregada por el sistema de alimentación externa. Caso teórico: N=1, M=6.



Fuente: Elaboración propia.

Tal y como se ha visto en la Figura 5, el sistema de almacenamiento formado por baterías no es suficiente por sí solo para dar la potencia requerida por el tranvía en todo su recorrido. En este caso carece de sentido probar el sistema en la ruta real, puesto que no es capaz de satisfacer la potencia del tranvía en el recorrido teórico, por lo que se puede concluir que este sistema no es apto por sí solo para sustituir a un sistema de almacenamiento externo. No obstante, las baterías pueden ser un sistema de almacenamiento complementario al sistema de alimentación externa, permitiendo reducir el dimensionamiento de éste en cuanto a potencia.

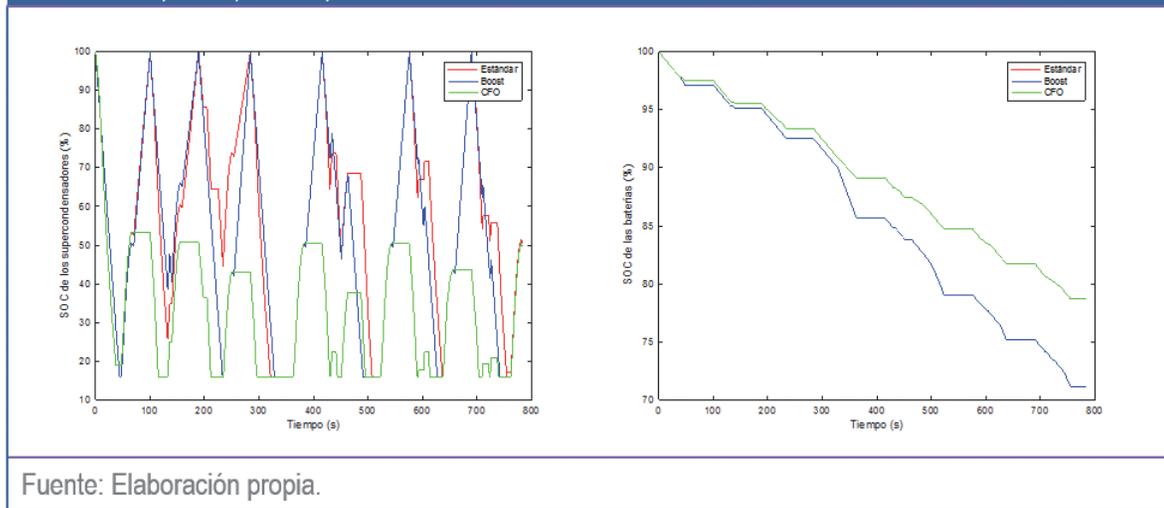
Una vez que se ha observado el comportamiento de los supercondensadores y de las baterías individualmente, parece que las debilidades de un sistema son las fortalezas del otro. Por lo tanto, se ha diseñado un sistema que cuente con las dos tecnologías: supercondensadores para poder satisfacer los picos de potencia del consumo del tranvía y baterías como fuente de energía base, para cantidades limitadas de potencia.

En la parte izquierda de la Figura 6, que se refiere a este sistema mixto, se puede observar el estado de carga del sistema de supercondensadores. En los modos impulso y CFO éste llega a su valor mínimo constantemente, por lo que su comportamiento no es óptimo. En comparación con el caso de sólo supercondensadores, éstos se comportan mejor que cuando están combinados con baterías. Debido a la aplicación, en este caso, tranvías, la potencia demandada es alta para ser suplida sólo con baterías, y los supercondensadores por sí solos pueden entregar la energía necesaria durante casi todo el recorrido, como ya se observó en la Figura 4. En este caso, el elevado peso de las baterías hace que se reduzca el número de supercondensadores posibles a instalar debido a las restricciones de masa, reduciéndose también la energía que éstos últimos pueden almacenar. Por ello, tal y como se observa, el estado de carga de los supercondensadores en ciertas partes del recorrido llega a su valor mínimo. De todas formas, hay que destacar el comportamiento del sistema de almacenamiento en el modo estándar, ya que los supercondensadores no llegan constantemente al nivel de mínima energía tal y como pasa en los otros modos.

Para las baterías, se puede observar en la parte derecha de la Figura 6 su comportamiento. En los casos estándar y CFO, el comportamiento de las baterías es similar ya que darán 100 kW en

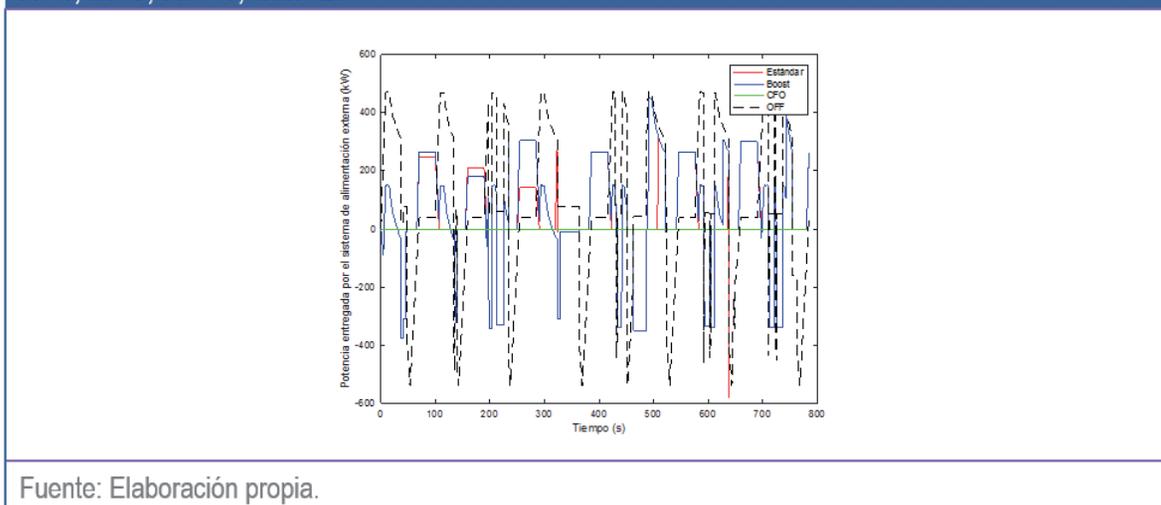
caso de que la potencia demandada por del tranvía sea mayor. Cuando la potencia demandada por el tranvía es menor a ese valor, las baterías se encargarán de suministrar al tranvía toda la energía necesaria. En el modo impulso el comportamiento es diferente: el sistema de baterías dará una potencia constante de 100 kW en las fases de aceleración y velocidad constante. Por ello, en ciertos tramos donde la potencia demandada por el tranvía es menor, el sistema de baterías suministra siempre 100 kW, devolviendo parte a la red. Por ello, la descarga de las baterías en este modo es mayor, como se puede observar en la Figura 6.

Figura 6. Estado de carga del sistema de supercondensadores y baterías. Caso real: Mixto. N=4, M=8, NN=1, MM=2.



Por último, en la Figura 7 se observa la potencia entregada por el sistema de alimentación externa. En el modo impulso la potencia negativa muestra que el sistema de almacenamiento entrega una buena parte del tiempo potencia al sistema de alimentación externa. Así mismo se observa cómo la potencia de carga en el modo estándar no es tan alta como en el modo impulso, ya que los supercondensadores no llegan a descargarse tanto, siendo en esta simulación más parecidas.

Figura 7. Potencia entregada por el sistema de alimentación externa. Caso real: Mixto. N=4, M=8, NN=1, MM=2.



4. Conclusiones

En cuanto a los tres modos definidos, el estándar es el que mejor se comporta con relación a los objetivos de suministrar energía al tranvía durante todo su recorrido, minimizando la presencia del sistema de alimentación externa. La principal desventaja del modo impulso es que, a pesar de entregar potencia aun cuando el tranvía no la necesita y se pueda devolver a la red para otros tranvías, el sistema de almacenamiento se descarga por lo general muy rápido llegando a su límite de energía mínimo, comprometiendo el objetivo de alimentar al tranvía en todo su recorrido. Respecto al modo CFO, ha quedado claro que hoy en día no existe tecnología que, sin poder cargarse en las paradas, pueda suministrar energía al tranvía durante todo su recorrido sólo con la carga en el frenado, puesto que el sistema de almacenamiento llega su límite inferior de energía constantemente no pudiendo ser una fuente de alimentación continua.

Respecto a las dos tecnologías de almacenamiento estudiadas, cabe destacar el mejor comportamiento de los supercondensadores frente a las baterías. El alto nivel de potencia que los primeros pueden entregar en una aplicación donde esos valores se requieren, como es el caso de los tranvías, es la clave de su ventaja. La única pega que tienen los supercondensadores reside en la baja energía que pueden entregar, puesto que se llega a límites de energía mínima en alguna ocasión cuando se someten al trayecto real del tranvía. Pese a esto, los supercondensadores presentan un comportamiento aceptable y un buen compromiso entre peso, potencia y energía, por lo que, en términos del objetivo del proyecto, es decir, alimentar al tranvía en la totalidad o mayor parte de su recorrido, presentan un comportamiento superior al caso de las baterías o al caso de la combinación entre las dos tecnologías.

En cuanto a las baterías, su alto peso y su baja densidad de potencia hacen que no puedan sustituir a la catenaria en todo ni en la mayor parte del recorrido. No obstante, sí que pueden ser un complemento para sistemas auxiliares que requieran una cantidad de potencia no muy alto, dada su alta capacidad energética. Otra opción puede ser la de usar baterías como sistema de alimentación complementario al tranvía, junto con el sistema de alimentación externo, permitiendo reducir la potencia de dimensionamiento de éste.

Por último, el caso mixto, que cuenta con las dos tecnologías, no funciona tampoco según lo requerido, o por lo menos no tan bien como lo hacen los supercondensadores individualmente. La elevada masa de las baterías hace que la potencia que puede entregar el sistema de almacenamiento se vea reducida debido a la reducción a su vez de supercondensadores a instalar, no pudiendo ser esa potencia en el caso de las baterías y energía en el caso de los supercondensadores suficientes para satisfacer la demanda del tranvía.

Por lo tanto, se puede concluir que, en esta aplicación, el modo estándar y los supercondensadores han resultado ser la combinación óptima como sistema alternativo a la catenaria. Las baterías o un sistema mixto pueden intentar reducir la potencia instalada en el sistema de alimentación externo, pero en ningún caso pueden aspirar a sustituir a éste.

En cuanto a las posibilidades de desarrollo futuras de este campo, es decir, de los sistemas de almacenamiento, tienen que ver con la mejora de las prestaciones de los actuales. La utilización de nuevos materiales, así como la mejora de la eficiencia de los citados sistemas, puede llevar a un mejor desempeño de éstos. Ello se debe traducir también en relajar uno de los límites más restrictivos actualmente: su masa. La posibilidad de contar con sistemas de una masa menor puede suponer una mejora en los niveles de potencia y energía, al poder instalar más unidades de almacenamiento en el tranvía. Por ello numerosos proyectos que cuentan con estas tecnologías siguen tratando de optimizar todavía más el funcionamiento de supercondensadores y baterías.

5. Bibliografía

- Instituto Para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Sitio Web: <http://www.idae.es/index.php> (visitada 07 septiembre 2016).
- García Álvarez, A., & Martín Cañizares, M. d. (2008). Cuantificación del consumo de energía eléctrica en el ferrocarril español. Fundación de los Ferrocarriles Españoles. Madrid: Monografías ElecRail.
- Stanley, M. (2012). History, Evolution and Future Status of Energy Storage. Proceedings of the IEEE, 100: 1518 - 1534.
- Rodríguez, A. (2009). Tranvía sin catenaria desarrollado por CAF y basado en el empleo de ultracondensadores. Vía Libre.
- Factron S.A. SuperCap: Condensadores de doble capa y módulos con capacidades hasta 12.000 Faradios de WIMA. REE. Jun. 2011.