

## SISTEMAS HÍBRIDOS DE ALMACENAMIENTO NO CONVENCIONALES ORIENTADOS A APLICACIONES MÓVILES

Gubkien, Alex Benjamín. Moré, Jerónimo José. Puleston, Paul. Mancini, Claus Nahuel. Talpone, Juan Ignacio.

Instituto LEICI. Calle 48 y 116, CC 91 (1900). [benqubkien@gmail.com](mailto:benqubkien@gmail.com).

**Introducción** La industria automotriz se ha convertido en una de las industrias más importantes a nivel mundial, no solo económicamente, sino también por su impacto en el sector de investigación y desarrollo. Además, hay una cantidad cada vez mayor de vehículos en las calles, lo que nos permite movernos de forma rápida y cómoda. Sin embargo, esto ha generado un aumento dramático de los niveles de contaminación en el aire en zonas urbanas (por ejemplo, de partículas finas, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, dióxido de azufre, etc.). Por lo tanto, las autoridades de las naciones más desarrolladas están alentando el uso de vehículos eléctricos (EVs, del inglés *Electric Vehicles*) para disminuir la concentración de contaminantes en el aire, CO<sub>2</sub>, así como otros gases de efecto invernadero.

Estos vehículos eléctricos deben poseer un sistema de almacenamiento de energía con alta densidad de energía másica para permitir una distancia de manejo larga, y alta densidad de potencia másica para la aceleración, frenado y manejo en ascenso. Sin embargo, las baterías actuales no pueden satisfacer ambos requerimientos al mismo tiempo. Por lo tanto, es necesario crear un sistema que reúna dos o más dispositivos cuyas características cumplan al menos una necesidad de los EVs.

Combinar componentes en sistemas híbridos para aprovechar los beneficios de cada parte siempre fue una perspectiva atractiva. En los últimos años, varios proyectos han sido exitosos en construir estos sistemas híbridos de almacenamiento de energía para energía solar y eólica. Aunque la idea no es nueva, la tecnología aún se encuentra en una fase temprana. Los sistemas híbridos de almacenamiento de energía (siglas HESS, del inglés *hybrid energy storage systems*) pueden referirse a distintos tipos de arreglos, con lo único en común siendo que dos o más tipos de almacenamiento de energía son combinados para formar un único sistema.

En este contexto, este trabajo tiene por objetivo realizar un estudio de un tipo de sistema híbrido particular, en el cual se combinan baterías de litio y supercapacitores para aplicaciones móviles. En los primeros tres capítulos se brinda una introducción a los elementos fundamentales en los que se basa este trabajo: los sistemas de almacenamiento, los convertidores electrónicos CC-CC utilizados para poder crear el sistema híbrido, y finalmente la arquitectura digital utilizada para implementar el sistema de control. Luego, a partir de los requerimientos dados para el sistema, se diseña e implementa un sistema de control propuesto. Por último, se realizan una serie de ensayos para corroborar el correcto funcionamiento del sistema a lazo cerrado de control.

**Parte experimental, resultados y discusión** Para llevar adelante los ensayos sobre el HESS en sus distintas configuraciones, se implementó en un kit FPGA una estructura de control a lazo cerrado capaz de mantener las tensiones y corrientes estables en cada uno de los

convertidores. Dependiendo de la topología bajo estudio, se encuentran presentes un sistema de control de tensión, el cual se trata de un lazo de control anidado implementado en el convertidor electrónico CC-CC vinculado, o también un lazo de control de corriente cuya referencia fuerza que la corriente del banco de supercapacitores sea cero, mientras que también lleve a su tensión al valor de referencia.

La primera configuración ensayada con los supercapacitores fue colocando al banco en el lado de baja tensión del convertidor, en paralelo con la fuente principal del sistema de ahora en más llamada módulo de almacenamiento principal (MAP), la cual se trata de una fuente de potencia. El esquema propuesto que representa a la topología usada para esta serie de ensayos puede observarse en la Figura 1.

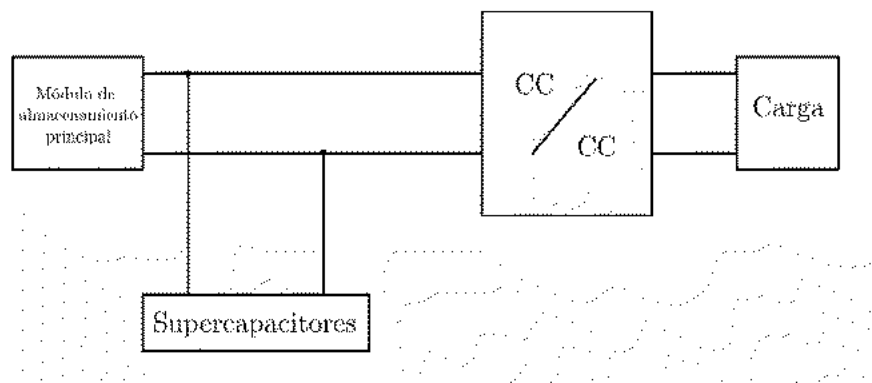
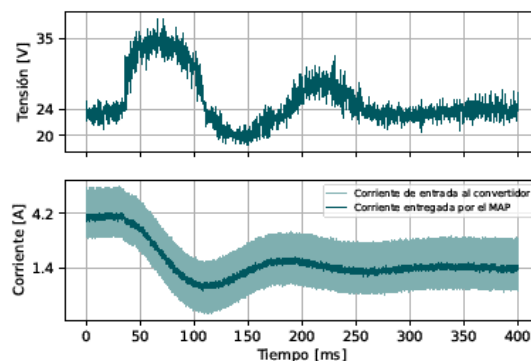
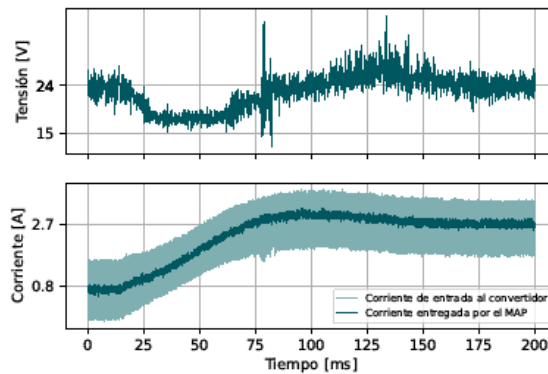


Figura 1. HESS con supercapacitores en paralelo con el MAP.

En esta primera topología se busca que los supercapacitores naturalmente entreguen las variaciones rápidas de corriente, mientras que el MAP suministra la potencia media requerida. En la práctica, esto depende muchas veces de la propia respuesta dinámica interna del MAP. Por lo tanto, se evaluaron dos casos diferentes. El primer caso con una conexión directa entre el MAP y los supercapacitores y un segundo caso intercalando un inductor entre los SC y el MAP para emular una respuesta dinámica más lenta por parte de este último.

Los ensayos realizados con el banco de SC en el lado de baja tensión consistieron en la observación de la tensión de carga, la corriente de los supercapacitores, y la corriente del MAP al generar una variación de la resistencia de carga. Con un salto negativo de resistencia de  $40\Omega$  a  $20\Omega$  y uno positivo de  $20\Omega$  a  $40\Omega$ , se obtuvieron las formas de onda de las Figuras 2 y 3:

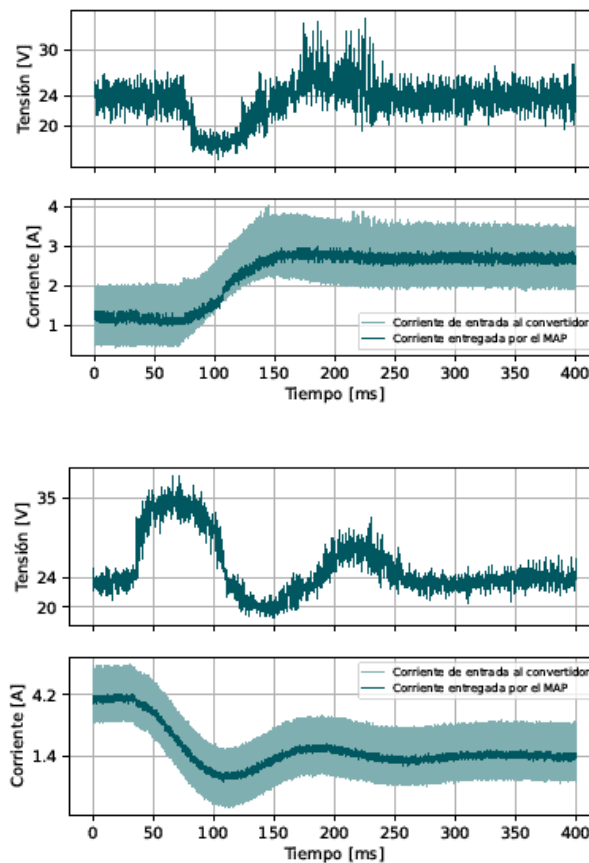




Figuras 2 y 3. Tensión de carga y corriente de inductor.

En ambos casos es posible observar cómo la corriente media es entregada por el MAP, mientras que el banco de supercapacitores fundamentalmente suministra al ripple de corriente del convertidor. Por lo tanto, es una situación en donde los SC no son aprovechados de buena forma, ya que solamente se encargarían de filtrar la corriente del MAP. Este comportamiento intrínseco es debido a la buena respuesta dinámica de la fuente de potencia utilizada y que podría replicarse con algunos tipos de baterías.

Colocado un inductor de  $2000\mu\text{H}$  entre el MAP y el banco de SC, se proceden a realizar los mismos ensayos mencionados anteriormente. En la Figura 4 pueden observarse las formas de onda obtenidas para un escalón negativo de resistencia de  $40\Omega$  a  $20\Omega$ , mientras que la tensión y las corrientes para el escalón positivo se encuentran en la Figura 5.

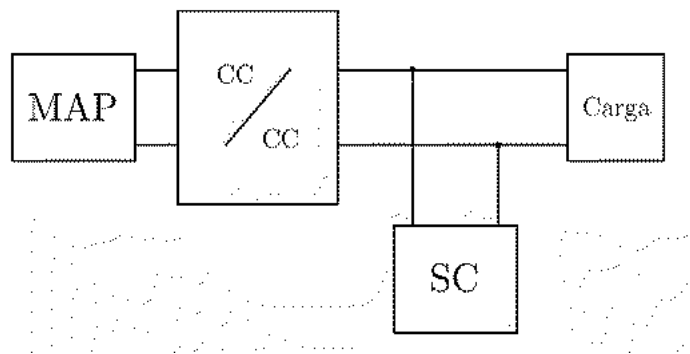


Figuras 4 y 5. Tensión de carga y corriente de inductor.

En estos ensayos, y especialmente el de la Figura 4, puede observarse cómo la corriente del banco de SC presenta una dinámica notablemente más rápida que la del MAP con el inductor, y por lo tanto es la que provee la demanda inicial provocada por el escalón de resistencia de carga. Después de un tiempo, ambas corrientes se establecen en el mismo valor medio. Para el escalón positivo de resistencia de carga se presenta el mismo comportamiento del sistema, pero para este caso, de forma menos acentuada.

Esta topología, con un MAP con una dinámica interna más lenta, permitiría al banco de SC suministrar la potencia en un pico de demanda, momento de mayor estrés del sistema. Aun así, es una topología que no permite ajustar esa dinámica de respuesta, sino que es el resultado natural de operación de cada dispositivo.

La configuración de la Figura 6 coloca al banco de SC directamente en paralelo con la carga y por tanto, al bus de CC. Debido a la gran capacitancia, la dinámica de la tensión de bus resulta mucho más lenta que en otros casos, debiendo ajustarse adecuadamente las ganancias de los controladores. Por otro lado, la variación de tensión respecto al valor de referencia es despreciable o extremadamente pequeña.



Figuras 6. HESS con supercapacitores en paralelo con la carga.

Partiendo de una condición de estado estacionario sobre la tensión del bus y de los SC, se realizan saltos de resistencia de carga y se registran la tensión y corrientes resultantes. En la Figura 7 se grafican las formas de onda con un escalón positivo de resistencia, nuevamente de  $20\Omega$  a  $40\Omega$ .

En este ensayo se observa cómo en un lapso aproximado de 13 minutos, en el cual la tensión de carga presenta un leve sobrepico de aproximadamente 600mV para después establecerse en la tensión de referencia de 24V. Para el caso de la corriente media del inductor del convertidor, se presenta una forma de onda próxima a una respuesta amortiguada.

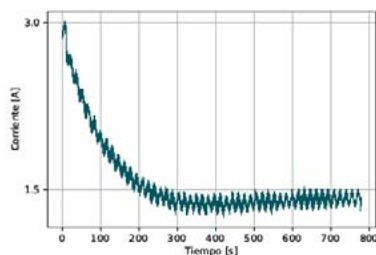


Figura 7a. Corriente por el inductor.

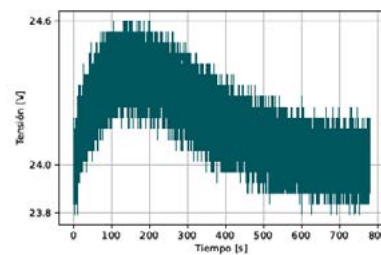


Figura 7b. Tensión en la carga.

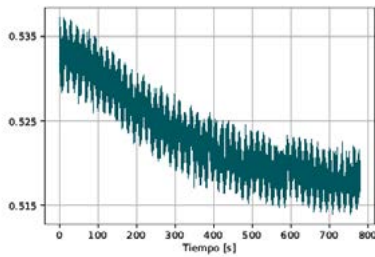


Figura 7c. Acción de control de tensión.

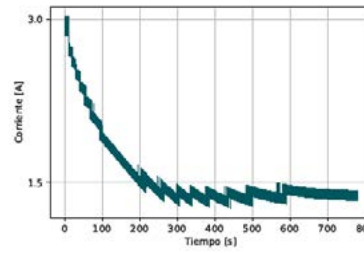


Figura 7d. Acción de control de corriente.

Figura 7. Formas de onda obtenidas con un salto positivo de resistencia.

Esta topología presenta una gran insensibilidad respecto a las perturbaciones que se puedan presentar en la carga, ya que la gran capacitancia del banco genera un cambio pequeño y lento en la tensión de salida. Por otro lado, el MAP responde lentamente para ajustar la corriente media y por lo tanto equiparar la potencia requerida por la carga. Como contrapartida, al mantenerse la tensión de los SC siempre alrededor del valor de referencia, no suele aprovecharse en gran medida toda la energía acumulada en ellos.

La última configuración bajo ensayo es una que posee el MAP, el banco de supercapacitores, y dos convertidores CC/CC independientes para cada módulo. Siendo esta una topología más versátil, se presentan en esta sección distintos ensayos llevados adelante. El primer ensayo de esta topología de la Figura 8 consistió en la carga del banco de supercapacitores a 12V, para luego realizar pequeños escalones de unitarios de la tensión de bus, de 16V a 24V. Esta prueba fue realizada con una resistencia de carga 40Ω, y una tensión del MAP de 12V.

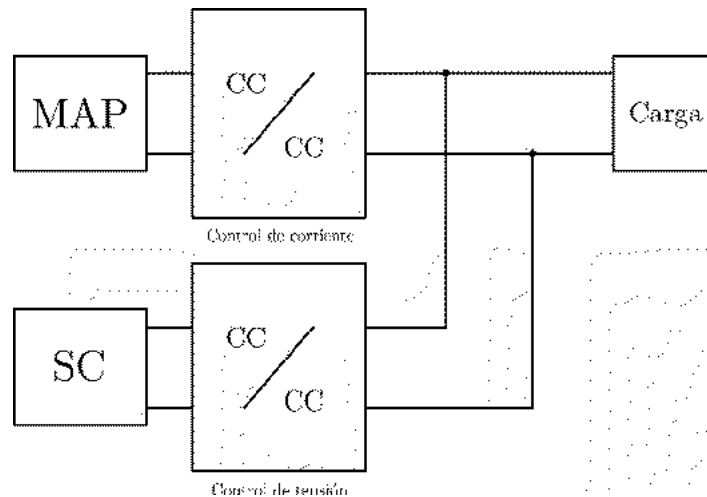


Figura 8. HESS con MAP, supercapacitores y dos convertidores.

En las Figuras 9 y 10 pueden observarse las tensiones del banco y del bus y las corrientes del MAP y del banco de SC durante el proceso inicial de carga. En esta etapa, se utiliza una referencia de corriente manual sobre el MAP. Se observa entonces una rampa positiva en la tensión de los SC y una corriente constante. Luego, al activar la referencia automática del control de corriente del MAP, se observa una respuesta dinámica lenta que tiende a llevar a cero la corriente en los SC. El pico inicial que se observa a los 75ms es debido a la inicialización de los integradores, y podría reducirse o suprimirse (no es el objetivo de este trabajo).

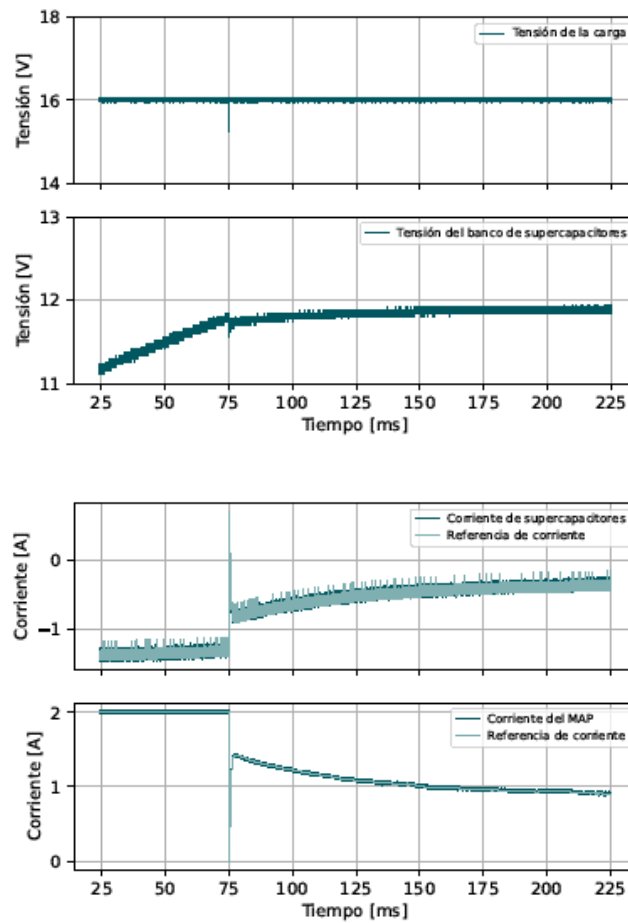


Figura 9 y 10. Tensiones de bus y de los SC. Corrientes del MAP y los SC.

Siguiendo con los ensayos sobre esta topología una vez que el proceso de carga es finalizado, se realizan una prueba de similares características al presentado en las dos topologías previas. Esto es, la variación de la resistencia de carga para observar la dinámica del sistema híbrido eléctrico completo.

En la Figura 11 se aprecia la respuesta del sistema con la dinámica descrita anteriormente ante repetidos cambios de carga. En la Figura 12 se muestran la tensión de bus y de los supercapacitores para este mismo ensayo. En particular para la tensión del bus, se observan pequeños pulsos que se corresponden con las variaciones de la resistencia de carga, pero la regulación de la misma es adecuada. En cuanto a la tensión en el banco de SC, se observan para este ensayo pequeñas variaciones de tensión ante las variaciones de demanda de carga (del orden de los mV). Por lo tanto, si bien no se estaría aprovechando completamente la energía del mismo, podría utilizarse un supercapacitor con una capacidad menor para operar en estas condiciones.

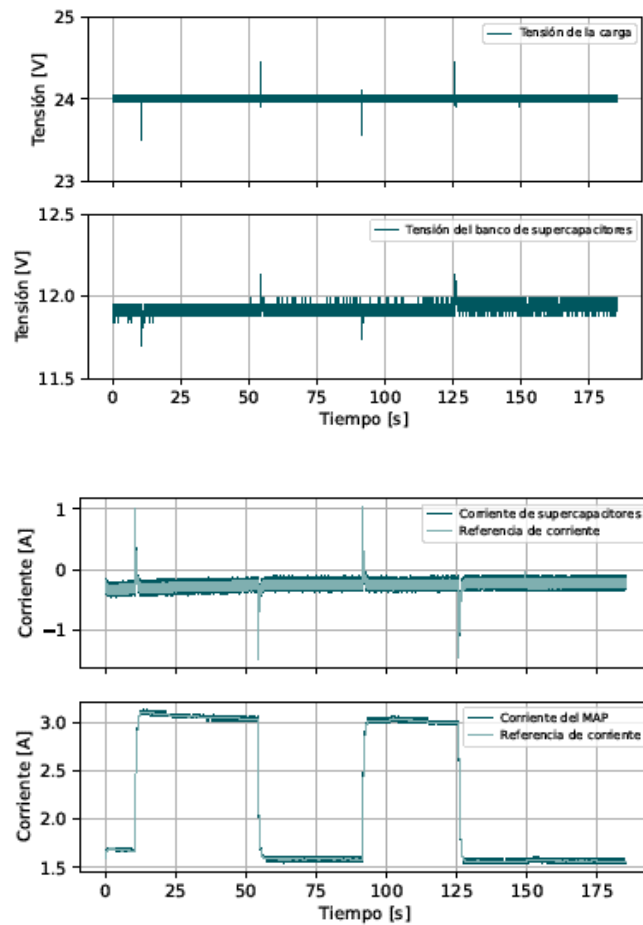


Figura 11 y 12. Corrientes de la carga y del banco. Tensiones del MAP y del banco.

Esta última topología permite aprovechar al máximo las ventajas de cada módulo de almacenamiento presentes en el sistema híbrido eléctrico de manera bidireccional, ya sea tanto para la absorción o entrega de energía. Es posible ajustar independientemente la dinámica de cada módulo, a la vez que permite escalar el sistema incorporando módulos adicionales en paralelo, inyectando, cada módulo extra, corriente al bus común de continua.

**Conclusiones** En el presente trabajo se realizó un estudio de sistemas híbridos de almacenamiento basados en baterías de litio y supercapacitores orientados a aplicaciones móviles. En este sentido, se ensayaron algunas de las topologías más difundidas, evaluando su desempeño frente a distintas perturbaciones. En todos los casos, se analizó la respuesta dinámica general del sistema, como también las respuestas complementarias del MAP y de los supercapacitores ante cambios de referencia y de carga.

En cada ensayo se obtuvieron excelentes resultados, demostrando experimentalmente la viabilidad de estas topologías, en las cuales la dinámica rápida del supercapacitor complementa adecuadamente la respuesta más lenta del MAP. No obstante, resultó de especial interés el último caso de estudio, centrado en una topología basada en dos convertidores CC-CC. La misma mostró mucha mayor versatilidad a la hora de controlar la respuesta dinámica de cada fuente, asegurando la entrega de potencia a la carga en todo momento.

Como trabajo a futuro se incorporarán los HESS desarrollados en la implementación de prototipos de vehículos urbanos de movilidad personal. Para expandir y optimizar las

prestaciones del sistema híbrido, en la siguiente etapa, se planea potenciar los convertidores electrónicos de potencia CC-CC, se evaluarán técnicas de control más eficientes y se analizarán las ventajas de utilizar distintas tecnologías de almacenamiento de energía.

### **Bibliografía**

- [1] Pedro O. Fornaro, Pedro E. Battaioto y Paul F. Puleston. "Estimación de los estados de carga y de salud en sistemas híbridos basados en supercapacitores y baterías de litio". En: Jornadas ITEE 6° (2021).
- [2] Amin Ghazanfari et al. "Active power management of Multihybrid Fuel Cell/supercapacitor power conversion system in a medium voltage microgrid". En: IEEE Transactions on Smart Grid 3.4 (2012), págs. 1903-1910. DOI: 10.1109/tsg.2012.2194169.
- [3] Hideaki Horie. "5 - EVs and HEVs: The Need and Potential Functions of Batteries for Future Systems". En: Lithium-Ion Batteries. Ed. por Gianfranco Pistoia. Amsterdam: Elsevier, 2014, págs. 83-95. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444595133000054>.
- [5] Hannah Ritchie y Max Roser. "Energy". En: Our World in Data (2020). <https://ourworldindata.org/energy>.
- [6] Diego A. Riva. "Diseño e implementación de módulo de seguridad para banco de supercapacitores basado en FPGA". Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, 2017.
- [7] Jian Sun et al. "Averaged modeling of PWM converters operating in discontinuous conduction mode". En: IEEE Transactions on Power Electronics 16.4 (2001), págs. 482-492.
- [9] Shuo Zhang y Rui Xiong. "HESS and Its Application in Series Hybrid Electric Vehicles". En: Modeling, Dynamics and Control of Electrified Vehicles. Ed. por Hui Zhang, Dongpu Cao y Haiping Du. Woodhead Publishing, 2018, págs. 77-119.