

## Introducción

En este trabajo, enmarcado en la línea de investigación de módulos de almacenamiento de energía no convencionales, se presentan avances en el diseño de un estimador para los Estados de Carga (EC) y Salud (ES) en un sistema híbrido de almacenamiento de energía conformado por baterías de Ión-Litio (BL) y Supercapacitores (SC). El objetivo del trabajo es obtener dichos estados del sistema a través de una precisa caracterización de los módulos de almacenamiento. Para esto se utilizan técnicas por Modos Deslizantes (MD) combinadas con algoritmos recursivos con factor de olvido, extrayendo el máximo provecho de la combinación de ambas técnicas.

### Sistema híbrido basado en SC y BL

En la fig. 4 puede observarse un esquema de la topología utilizada. Esta posee dos módulos de almacenamiento, conectados de forma independiente a través de dos convertidores DC/CD a un bus de tensión continua. En la fig. 4 también se presenta un esquema sencillo del método de estimación empleado.

El banco de SC fue íntegramente diseñado en el Instituto LEICI de la FI, UNLP-CONICET, y el mismo posee 80 [F] 27 [V] nominales. Se utilizaron SC de doble capa electrostática EATON Powerstore XV Series de 400 [F] y 2.7 [V] nominales. En cuanto a las BL, se dispone de un banco de 48 [V] construido con 16 celdas de baterías de tipo LiFePO4 en serie de 50Ah, reguladas con dos BMS industriales JBD 8S con protección por sobrecarga.

El objetivo de las BL es el de satisfacer la demanda de corriente correspondiente a la potencia media demandada. Complementariamente, los SC son los encargados de lidiar con las variaciones abruptas de corriente en el bus, mediante el empleo de un convertidor DC/DC independiente que mantiene regulada en un valor constante la tensión del bus.

### Modelo de circuito eléctrico equivalente (MCE) variante

Ha sido probado que los modelos de eléctrico (MCE) son aptos para representar la dinámica de las LB y de los SC, cuando estos se encuentran sujetos a perfiles de demanda variables, como los que se obtienen al utilizar estos módulos en vehículos eléctricos. Por este motivo, se utiliza un MCE con parámetros variantes en el tiempo de orden dos para las BL y de orden uno para el SC como puede observarse en la fig. 2.

Emplear un circuito variante en el tiempo posee múltiples ventajas. Por un lado permite modelar dinámica no lineal, tanto de las BL como de los SC. Respecto de las BL por ejemplo, es conocida la relación no lineal que existe entre la tensión de circuito abierto y el estado de carga. Por otro lado, todas las variaciones temporales que puedan ocurrir

en los parámetros del modelo serán detectadas. Por ende, también será posible mejorar el seguimiento de los EC y ES.

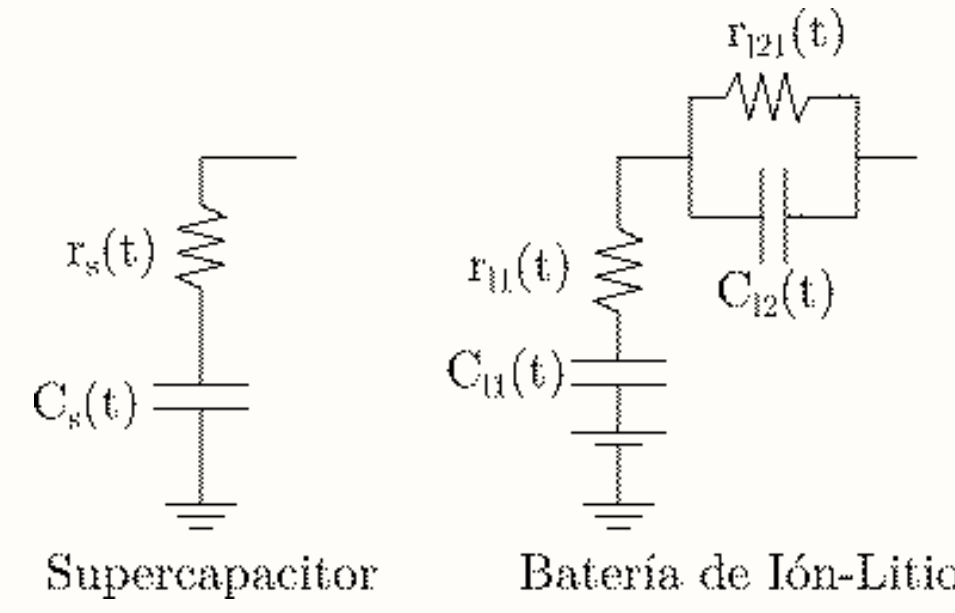


Figura 1: MCE utilizado para cada sistema de almacenamiento.

## Estimación paramétrica basada en diferenciadores por MD

Para determinar los mencionados EC y ES, se requiere de una estimación adecuada de los parámetros de los MCE. Para esto, las ecuaciones lineales de parámetros variantes en el tiempo del sistema son descritas a través de una transformación que permite obtener una ecuación lineal en los parámetros. Esto facilita el empleo de métodos de estimación recursivos, pero requiere de la obtención de las derivadas de las tensiones y corrientes de los módulos. Con el objeto de contar con una estimación robusta de estos parámetros se propone un esquema basado en diferenciadores por modos deslizantes.

### Estados de carga y de salud

Una vez que se cuenta con la estimación de los parámetros del sistema, es factible computar los EC y ES. Esto, son parámetros fundamentales para regular el comportamiento de los módulos de almacenamiento en operación. El EC permite cuantificar, respecto de la carga máxima de la batería, cuál es la carga disponible.

$$\begin{aligned} \hat{EC}_{s,l}(t) &= \frac{Q_{s,l}(t)}{Q_{max,s,l}} = \frac{Q_{s,l}(t_0) + \Delta Q_{s,l}(t)}{\hat{Q}_{max,s,l}} \\ &= \hat{EC}_{s,l}(t_0) + \frac{\Delta Q_{s,l}(t)}{\hat{Q}_{max,s,l}} \end{aligned} \quad (1)$$

Es factible actualizar correctamente la evolución del EC a través de una actualización no sólo de los parámetros del modelo de circuito eléctrico equivalente, sino también a través de una estimación de la máxima capacidad de carga disponible  $Q_{max}$ . Métodos sencillos como la medición de la integral de la corriente, o tablas de look-up basadas en la comparación entre las curvas de EC y tensión de circuito abierto brindadas por el fabricante, son aplicables en vehículos eléctricos sólo admitiendo errores muy considerables (>15%).

El ES permite cuantificar el grado de deterioro de las BL y/o de los SC. Este estado toma valores entre 1 (módulos sanos) y 0 (módulos no aptos para la aplicación en concreto). Los cuales se obtienen de comparar los valores de la impedancia serie y la máxima capacidad de carga, con los

valores nominales para estos parámetros y con los valores mínimos plausibles que podrían tomar estos parámetros para cada aplicación en concreto. Para el caso de vehículos eléctricos, se emplea como mínimo valor de referencia, un 80 % de la capacidad nominal máxima, y un 100 % de aumento en el valor de la impedancia serie. A modo ilustrativo, en este trabajo se emplea una evaluación del ES basado en la resistencia serie del MCE.

$$ES_{s,l} = \frac{r_{(s,l)_{eol}} - \hat{r}_{(s,l)}}{r_{(s,l)_{eol}} - r_{(s,l)_N}} \quad (2)$$

siendo las resistencias máxima admisible  $r_{(s,l)_{eol}}$  (end-of-life) y nominal  $r_{(s,l)_N}$  de cada módulo.

## Resultados

Para evaluar el algoritmo y la metodología propuesta, se asumió que el módulo SC/LB opera bajo la demanda de un perfil variable de corriente. El mismo fue generado consistentemente con el perfil de conducción vehicular estandarizado Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS).

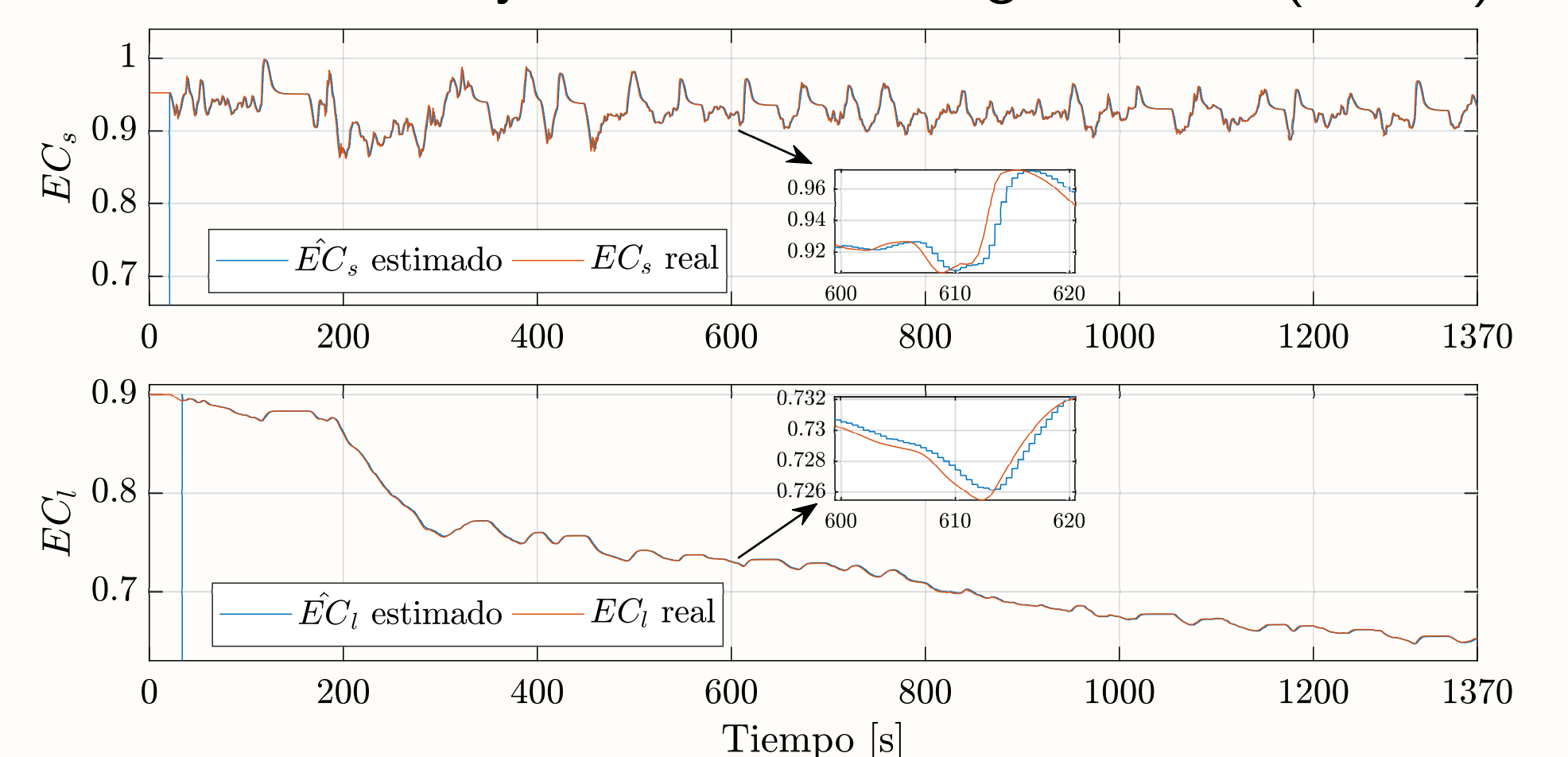


Figura 2: Respuesta del método de balanceo.

La comparación entre el EC real y el estimado, puede observarse en la Fig. 3. Puede apreciarse en las zonas con zoom, que el error se encuentra muy aproximadamente debajo del 2% para el ECS y es aún menor para el ECL. La estimación de los parámetros no solamente es una herramienta para el cálculo indirecto del EC, sino que también ofrece la posibilidad de inferir el ES de los módulos. Evaluando el ES mediante las resistencias serie de los módulos, como en la ecuación 1, se obtienen los resultados de la Fig. 4. Valores cercanos a 1 indican módulos sanos, y valores cercanos a cero manifiestan el deterioro de los mismos.

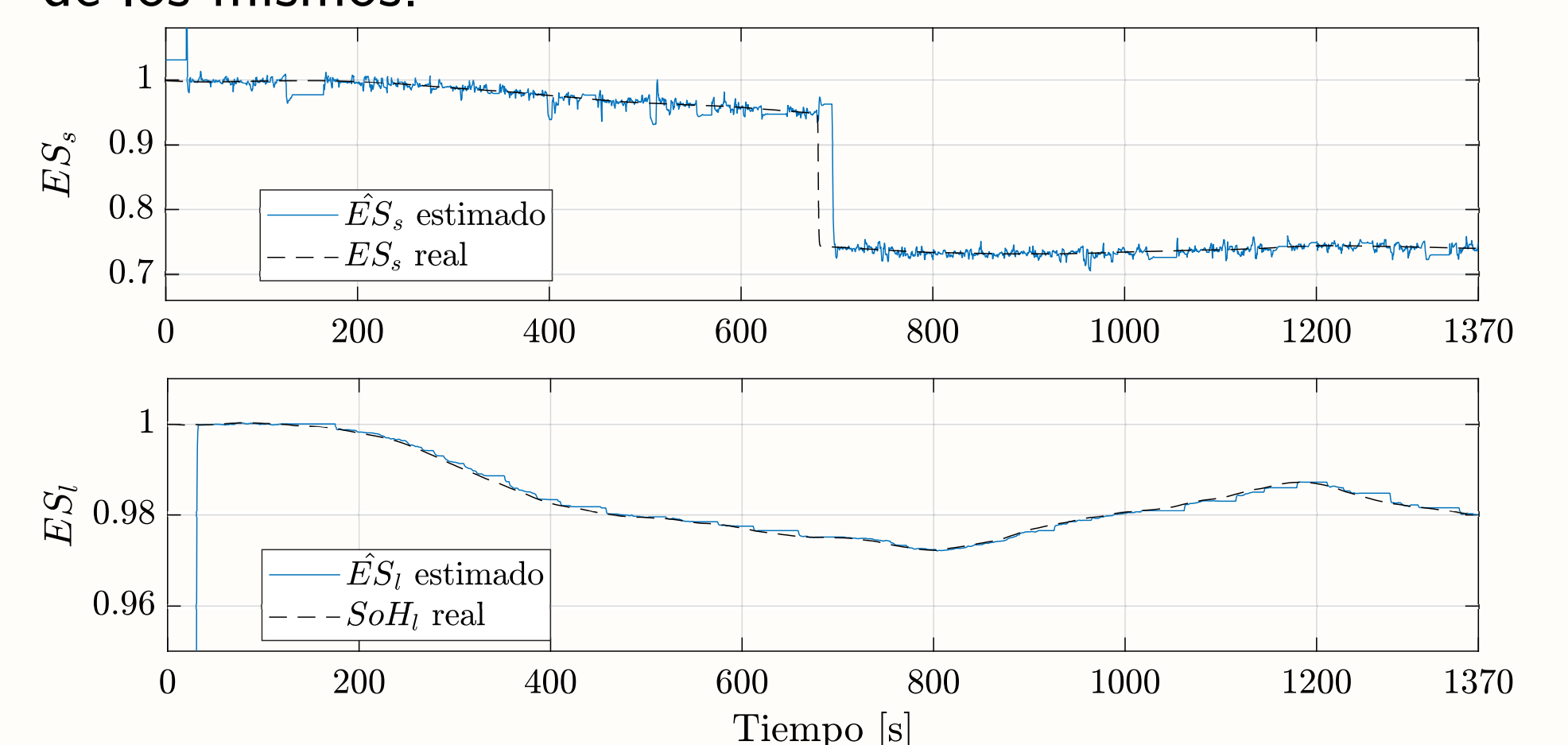


Figura 3: Estimación de los parámetros normalizados.

## Conclusiones

En este trabajo se presentaron algunos avances en el desarrollo de una metodología para estimar en tiempo real el EC y ES de un módulo híbrido de almacenamiento de energía basado en SC+BL. La principal contribución es el diseño de una metodología ad-hoc para aplicaciones vehiculares. El modelo de circuito eléctrico para los módulos de almacenamiento de energía fue utilizado con parámetros eléctricos variantes en el tiempo. Esto otorga gran flexibilidad y capacidad de lidiar con las no linealidades intrínsecas a estos módulos de almacenamiento. Los resultados mostraron que el algoritmo es capaz de seguir las variaciones del EC y realizar un seguimiento del ES en tiempo real, durante la operación de los módulos bajo un perfil de carga estandarizado para vehículos eléctricos.

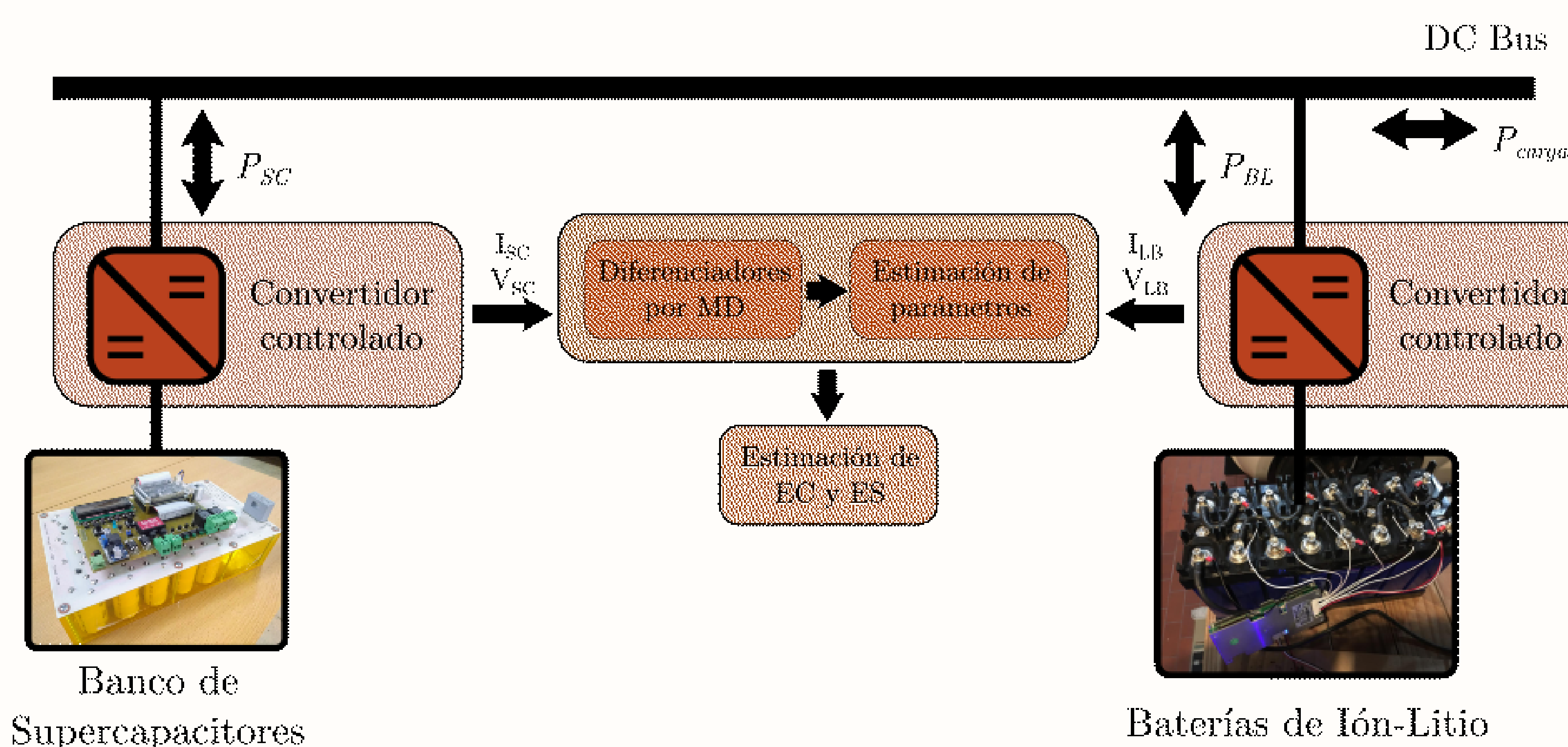


Figura 4: Sistema híbrido bajo estudio