

Introducción

Este trabajo, tiene por objetivo realizar un estudio de una serie de topologías de un tipo de sistema híbrido de almacenamiento de energía (siglas, HESS, del inglés *hybrid energy storage systems*) particular, en el cual se combinan baterías de litio y supercapacitores para aplicaciones móviles. Este HESS está compuesto además por convertidores electrónicos de potencia CC-CC, y un sistema de control implementado en una arquitectura digital de tipo FPGA.

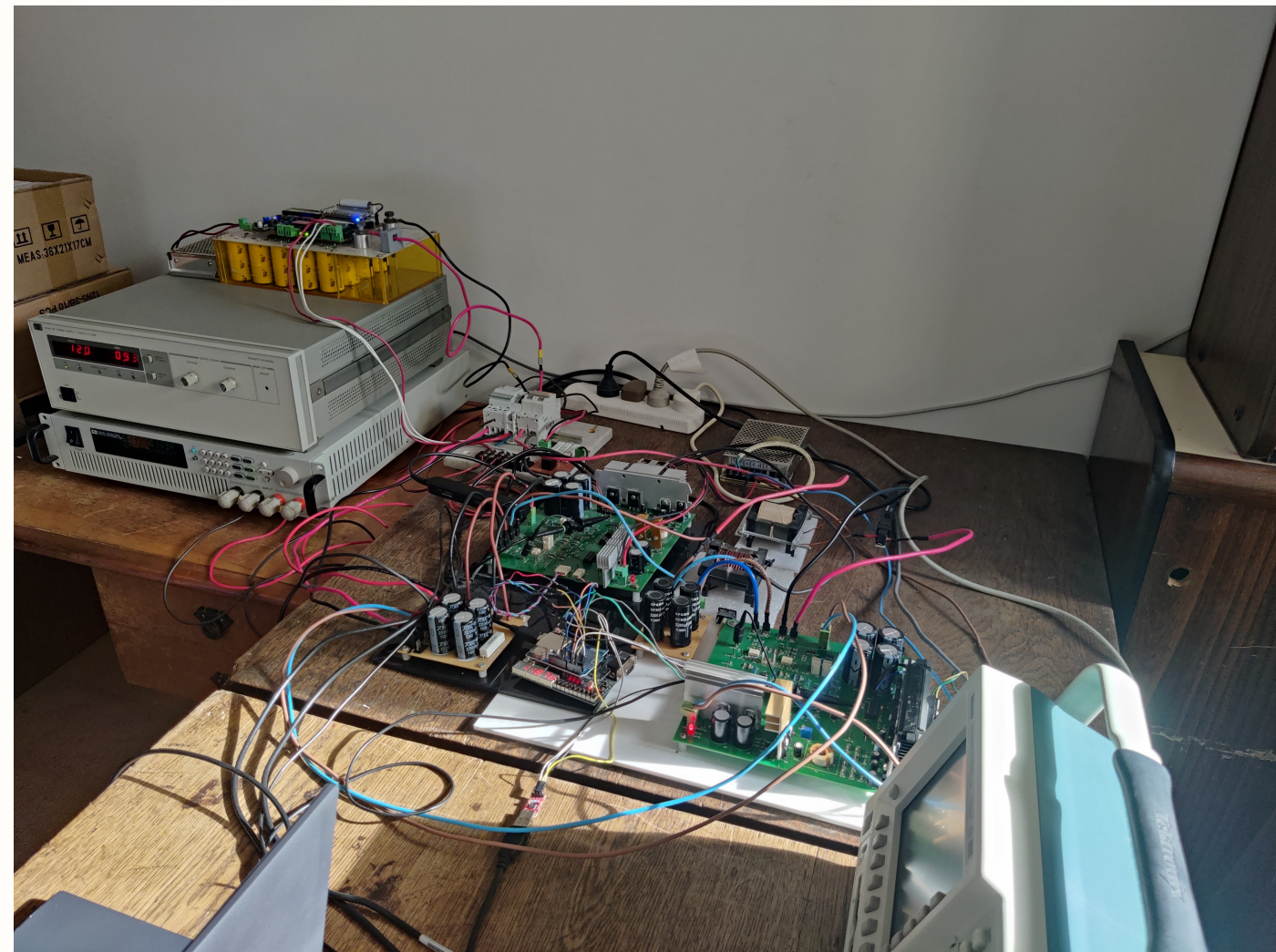


Figura 1: Sistema eléctrico híbrido.

En la Figura 1 puede observarse la configuración experimental realizada para una de las topologías del sistema híbrido eléctrico ensayadas.

Topologías del HESS

Las topologías analizadas en este trabajo están conformadas por elementos de almacenamiento de energía y de regulación de potencia. Las cuatro configuraciones del sistema híbrido bajo estudio en este trabajo (Figura 2) fueron diseñadas, simuladas, ensayadas, y sus resultados relevados para poder realizar una comparación de las características de cada una. Para este sistema híbrido, se reemplazaron a las baterías de litio con una fuente de potencia, debido a que las baterías carecían de un módulo de seguridad que permita limitar la corriente.

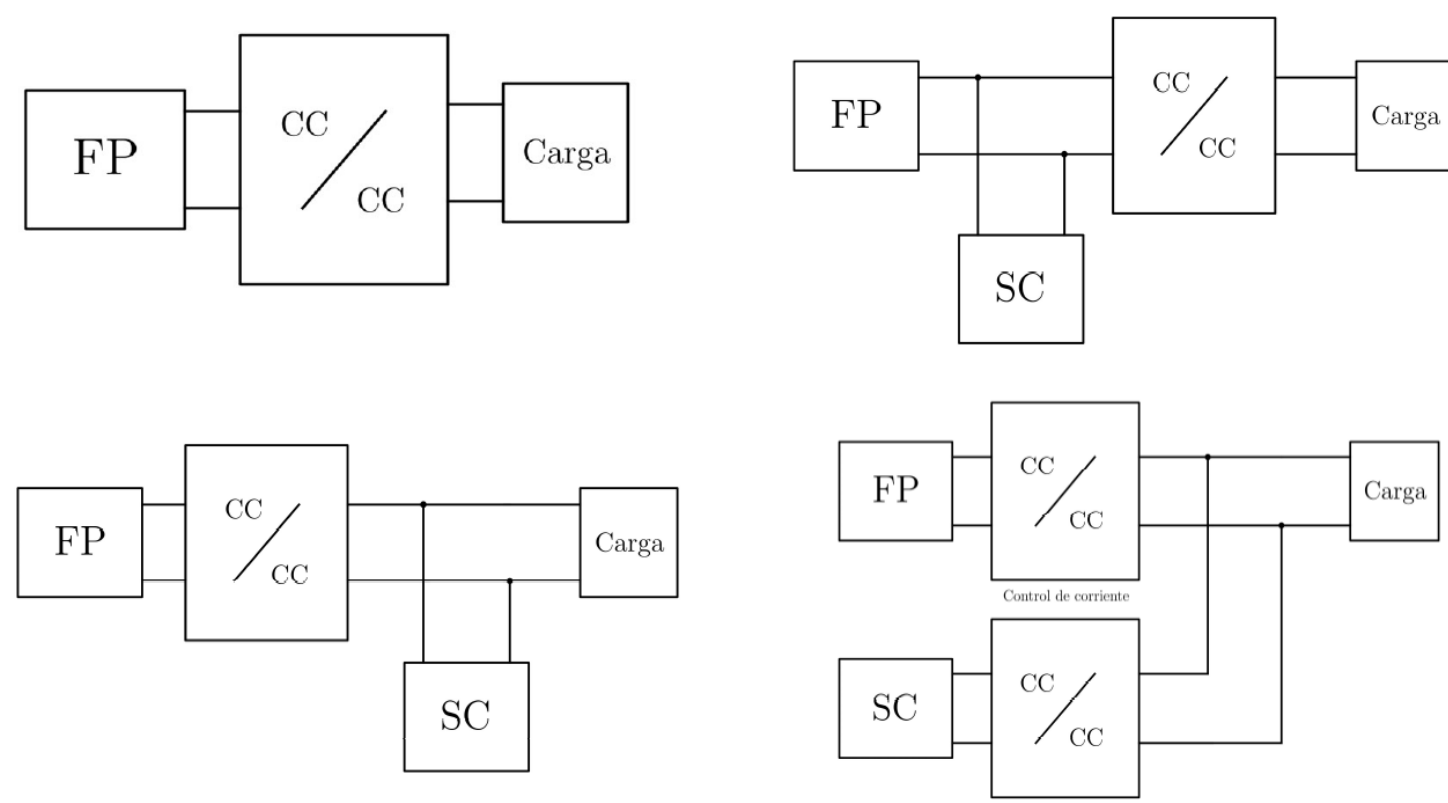


Figura 2: Las cuatro topologías bajo estudio.

Sistema de control implementado

Para llevar adelante los ensayos sobre el HESS en sus distintas configuraciones, se implementó en una arquitectura 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 uno o ambos lazos de control. En las topologías con un único convertidor CC-CC vinculado, el sistema de control se conforma por un lazo anidado con tanto control para la corriente de entrada como para la tensión de salida del convertidor. En la Figura 3 se observa el diagrama en bloques de este lazo y que fuera implementado en el FPGA utilizando Verilog en punto fijo de 32 bits.

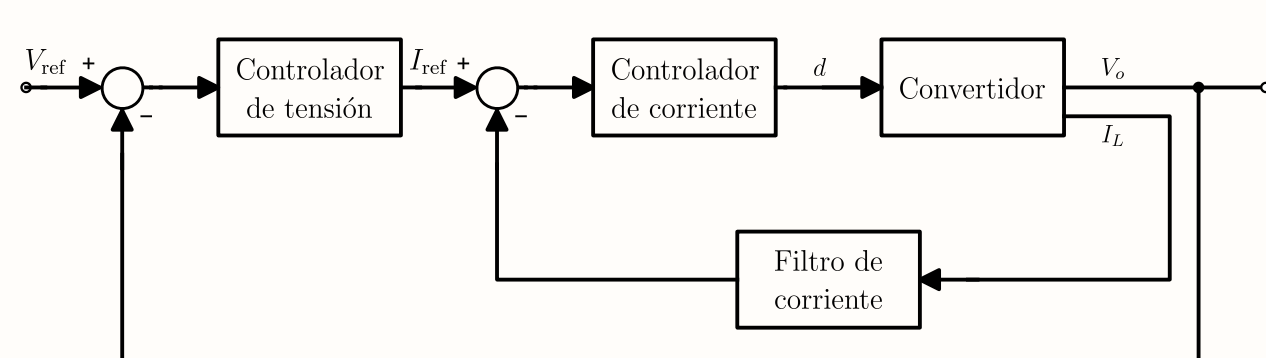


Figura 3: Lazo de control de tensión.

En el caso de la última topología, para el convertidor asociado a las baterías de litio (en el caso de los ensayos, a la fuente de potencia), se implementa un lazo de control de corriente con las mismas características del lazo interno de la Figura 3 en el convertidor vinculado a las baterías.

La referencia de corriente para este lazo de control se construyó a partir de forzar a la corriente del banco de supercapacitores a cero, mientras que también se lleve a su tensión al valor de referencia. Por lo tanto, resulta:

$$i_{FP_ref} = K_1 \int_0^t i_{SC} dt + K_2 \int_0^t (V_{SC_ref} - v_{SC}) dt \quad (1)$$

De este modo, mediante las ganancias K_1 y K_2 se puede ajustar la respuesta dinámica de las baterías de litio frente a las variaciones de demanda de carga y la velocidad de recarga de los supercapacitores.

Análisis y evaluación experimental del HESS

Una vez realizado el diseño y simulación de las distintas configuraciones del HESS, se procede a su ensayo. El banco de pruebas utilizado (Figura 1) para el sistema híbrido completo, el cual es el diagramado abajo a la derecha en la Figura 2, fue ensayado bajo distintos tipos de perturbaciones. El primer ensayo de esta topología consistió en la carga del banco de supercapacitores a 12V, para luego realizar pequeños escalones de unitarios de la tensión de bus. Al activar la referencia automática del control de corriente de la fuente, se observa la tendencia a cero de la corriente en los SC.

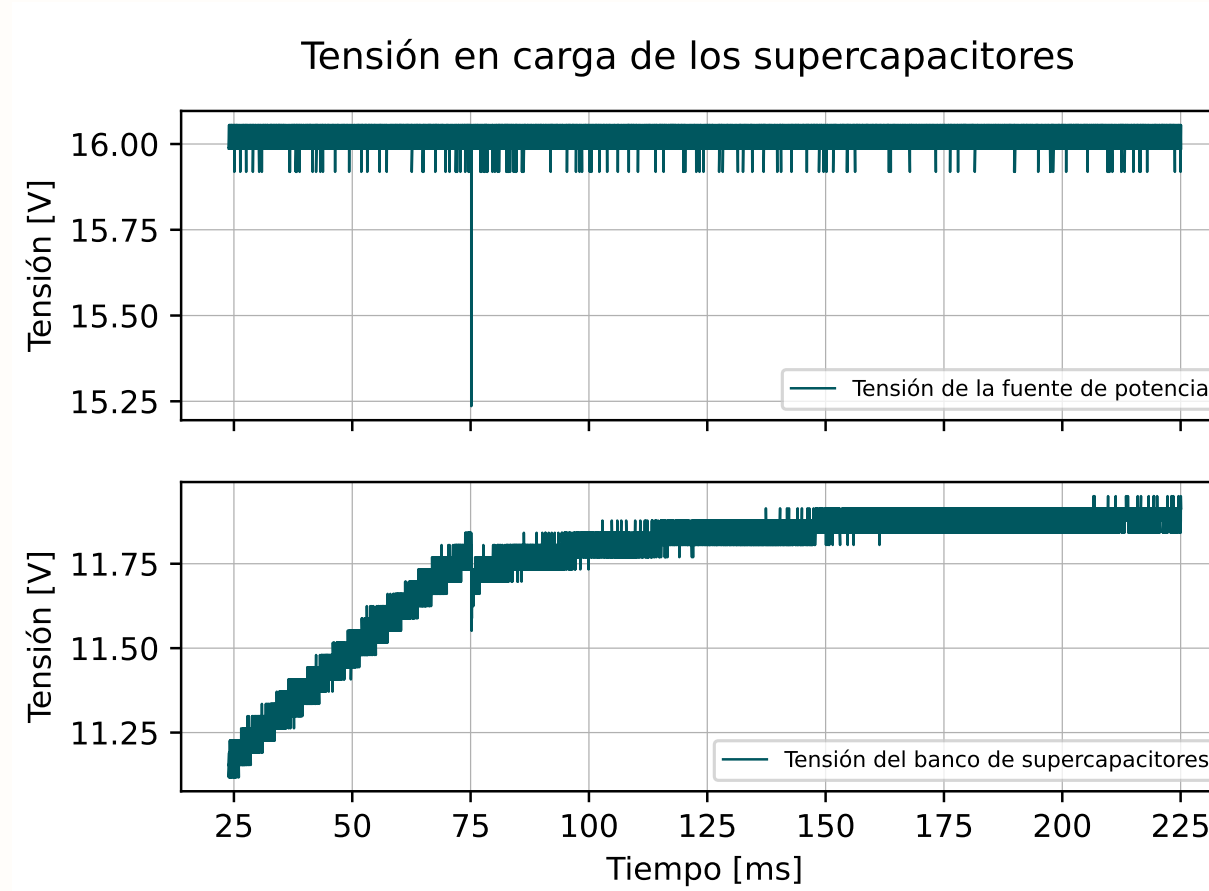


Figura 4: Tensión en la carga de supercapacitores.

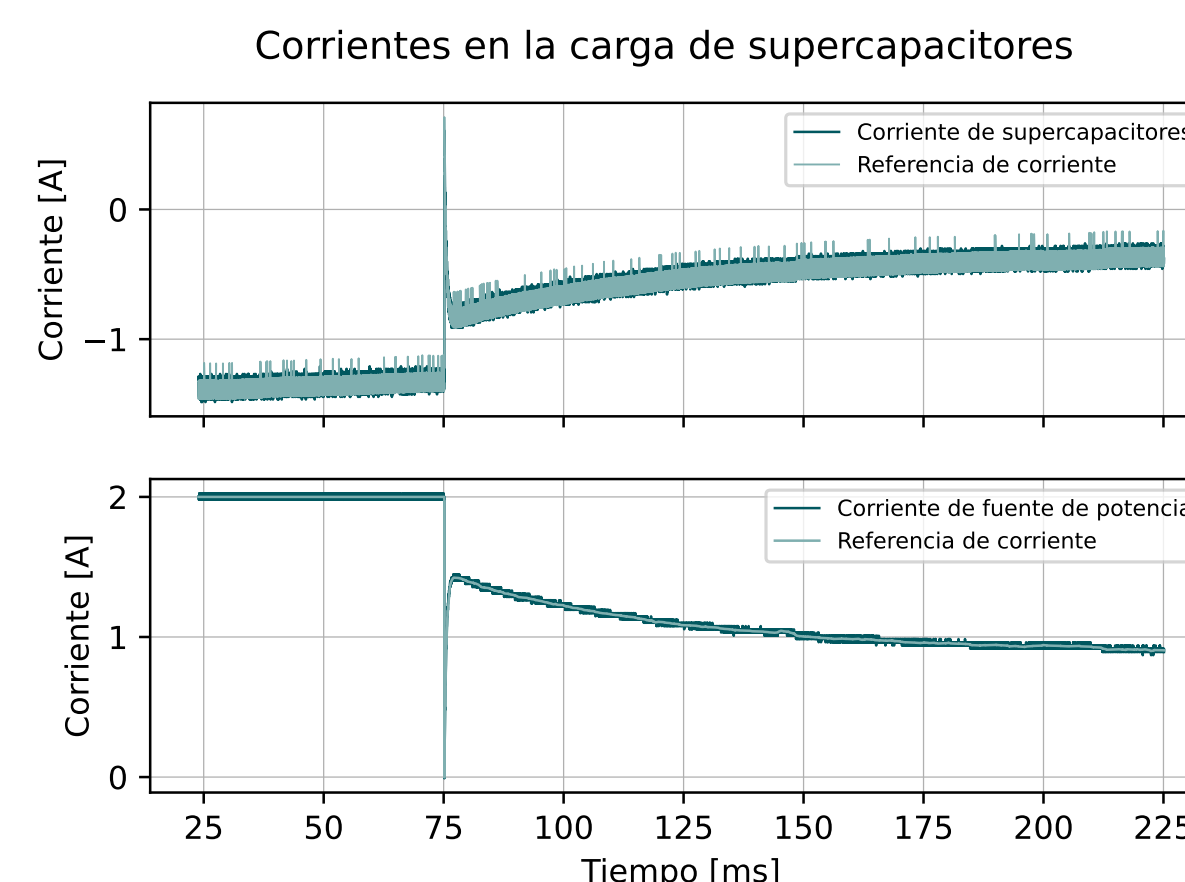


Figura 5: Corrientes en la carga de supercapacitores

En las Figuras 4 y 5 se aprecia la respuesta del sistema en el proceso de carga. Luego de haber cargado al HESS, se proceden a realizar saltos de la resistencia de carga. En las Figuras 6 y 7 se observa cómo las tensiones se mantienen reguladas a través del sistema de control, mientras que los SC se encargan de proveer el pico inicial de demanda, y luego la fuente lentamente va suministrando el valor medio.

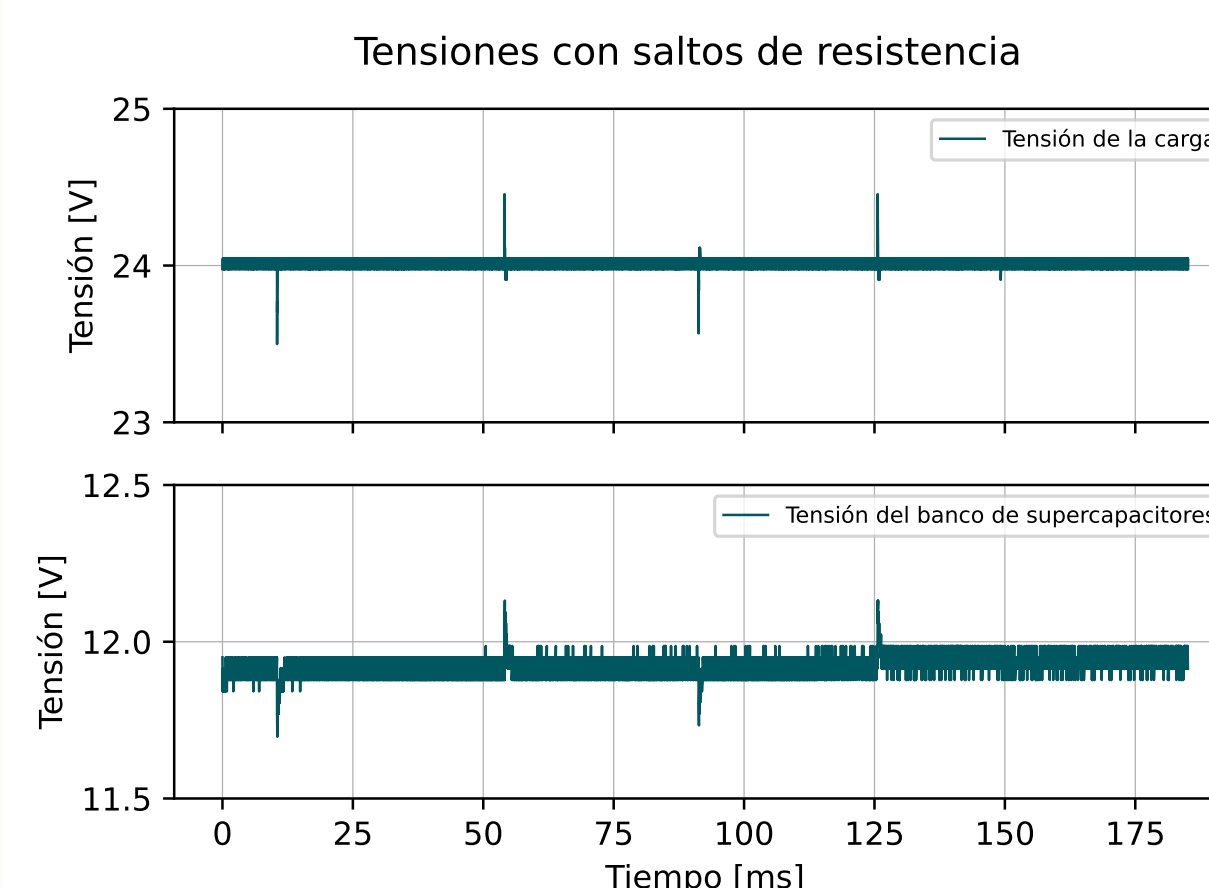


Figura 6: Tensiones en el segundo ensayo.

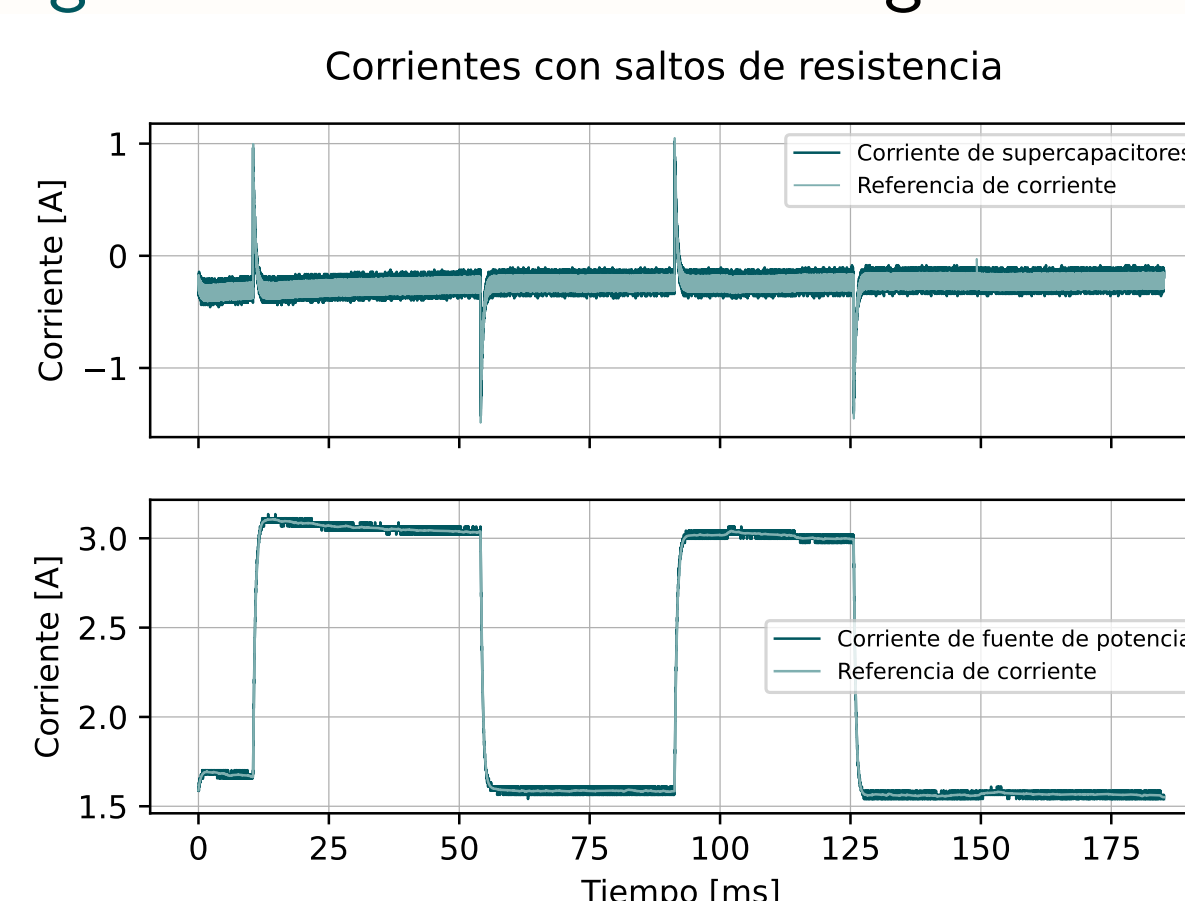


Figura 7: Corrientes en el segundo ensayo.

El último ensayo realizado con esta topología del sistema híbrido consistió en la variación de la tensión del banco de supercapacitores de 12V a 13V, un escalón de resistencia de 40Ω a 10Ω , luego un salto negativo unitario de la tensión del banco nuevamente a 12V, y finalmente otro escalón de resistencia 10Ω a 40Ω . El objetivo del mismo fue analizar la dinámica del sistema ante cambios de los distintos parámetros, asegurando siempre la tensión sobre la carga.

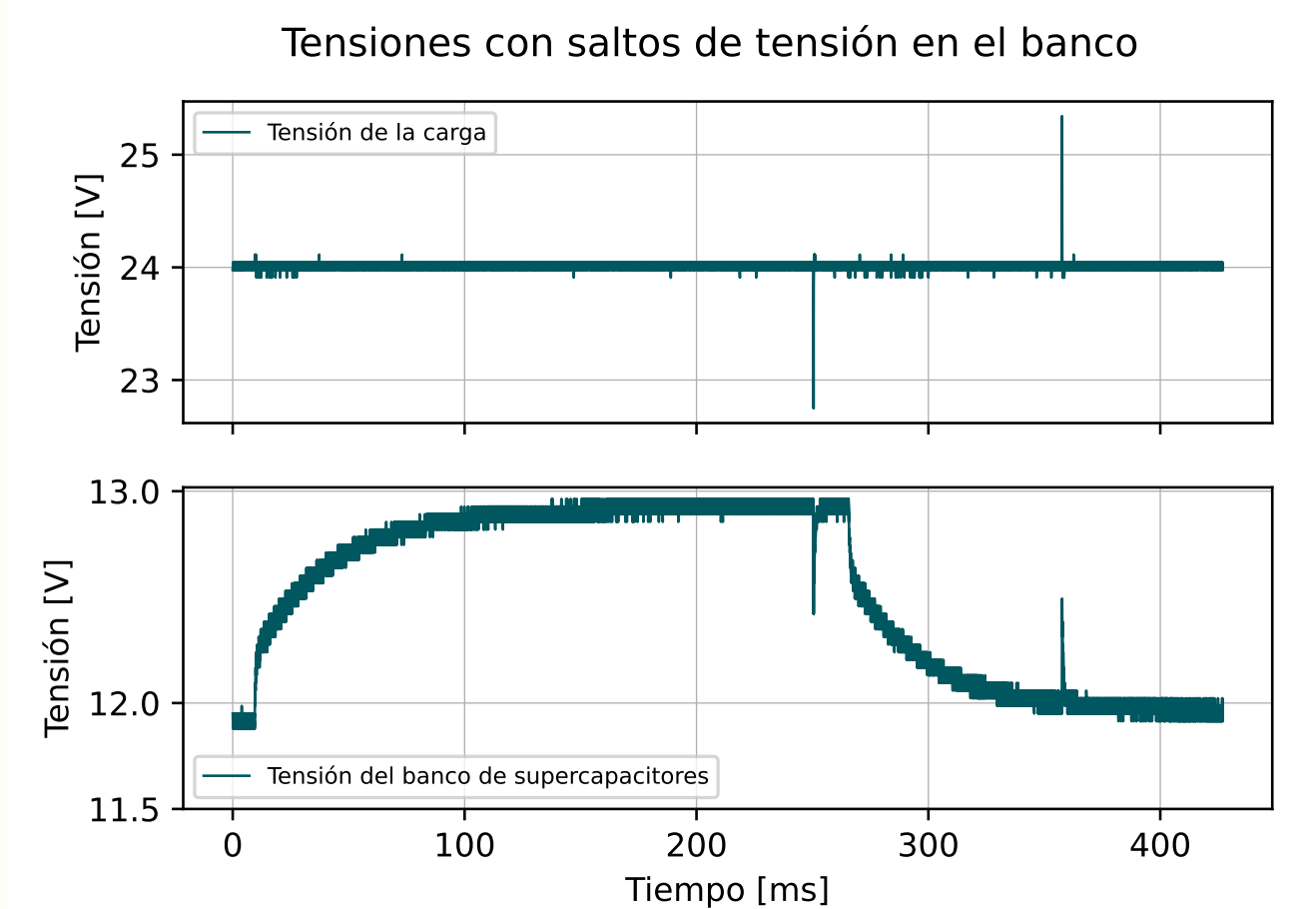


Figura 8: Tensiones en el tercer ensayo.

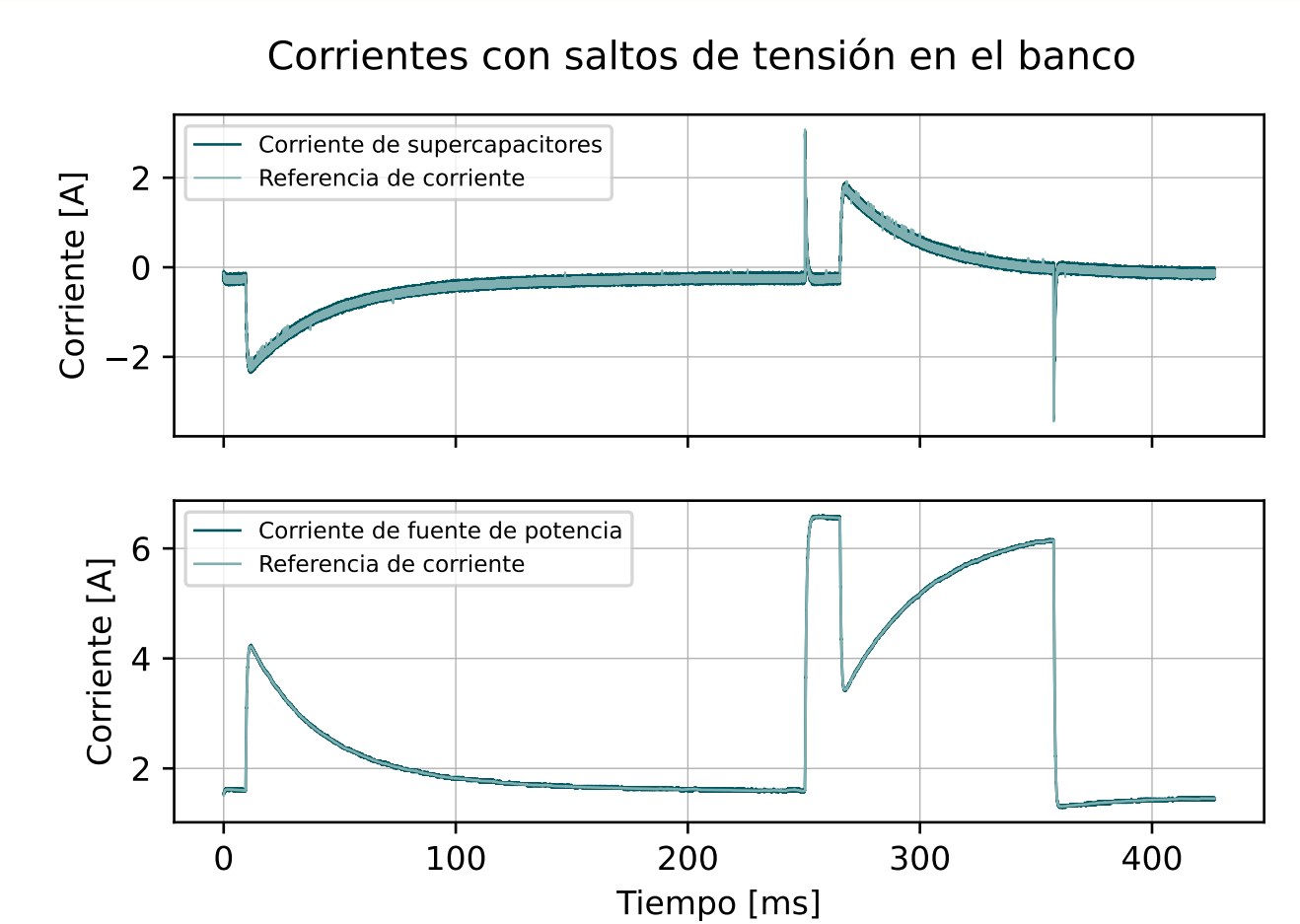


Figura 9: Corrientes en el tercer ensayo.

En la Figura 6 se presentan la tensión de los supercapacitores y la del bus. La lenta dinámica de la tensión del banco es deseable, ya que la recarga y descarga del banco de supercapacitores debe ser más lenta que las dinámicas de tensión del bus, para asegurar la sobrecarga de la fuente. Es importante destacar que a lo largo de este ensayo, aún ante los cambios de referencia en la tensión de los SC mencionados y luego la perturbación en la resistencia de carga, la tensión de bus se mantiene constante, salvando los pequeños transitorios rápidos y de poca amplitud. Esto también se ve replicado en las corrientes de la fuente y los SC, en la Figura 7.

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. Se analizó la respuesta dinámica general del sistema, como también las respuestas complementarias de la fuente de potencia, la cual emula a las baterías de litio por motivos de seguridad, 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 donde la dinámica rápida del supercapacitor complementa adecuadamente la respuesta más lenta de la fuente. 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.