Comparación entre varios tipos de co-simulación eléctrica aplicadas al sistema de distribución de potencia de un vehículo eléctrico híbrido

Víctor Díaz Alías, Andrés Barrado Bautista, Clara Marina Sanz García, Antonio Lázaro Blanco
Grupo de Sistemas Electrónicos de Potencia, Universidad Carlos III de Madrid
Av. Universidad 30, 28911 Leganés, Madrid
victor.diaz@uc3m.es, andres.barrado@uc3m.es

***Resumen*—Los vehículos que utilizan una pila de combustible como fuente primaria de energía (FCEV-Fuel Cell Electric Vehicle), requieren de una o varias fuentes de energía secundarias para suministrar la potencia demandada por el motor, o los motores, eléctricos que propulsan el vehículo y por el resto de los componentes conectados al bus principal. Esto es debido a la reducida respuesta dinámica, y las limitaciones en la dirección de la energía que presentan las pilas de combustible. Previo a la construcción experimental del sistema y después del diseño inicial, suele ser habitual y recomendable realizar un conjunto de simulaciones, co-simulaciones, y pruebas basadas en programas especializados, como puede ser PSIM, Simulink o Modelsim entre otros, o incluso Hardware in the Loop (HIL), para comprobar el correcto funcionamiento del sistema completo. En este trabajo, se muestran y comparan diferentes combinaciones de co-simulación basados en el uso de Simulink, PSIM, Modelsim, Vivado y HIL. Cada una de estas co-simulaciones tienen el fin de comprobar el funcionamiento del sistema diseñado y asegurar una buena implementación del control en el hardware.**

***Palabras clave*—Vehículo eléctrico, supercondensador, batería, control, arquitectura, pila de combustible, FPGA, co-simulación, System on Chip (SOC).**

I. Introducción

Las pilas de combustible de membrana de intercambio de protones, PEMFC (*Proton-exchange membrane fuel cell*), son elementos electroquímicos capaces de obtener potencia eléctrica a partir de reacciones químicas con hidrógeno y aire como combustible, generando como residuo agua y calor [1].

Los vehículos basados en el uso de pilas de combustible (FCEV-Fuel Cell Electric Vehicle) son una buena opción para sustituir a los vehículos actuales de combustión interna, ya que las pilas de combustible generan únicamente vapor de agua como residuo. Adicionalmente, los FCEV presentan ventajas con respecto a los vehículos puramente eléctricos actuales (EV) en cuanto a autonomía y a contaminación.

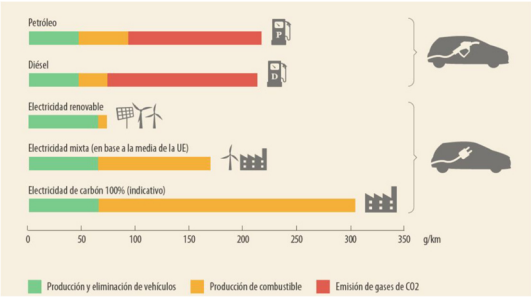

Figura 1. Contaminación producida por cada tipo de vehículo [2]

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España a través del proyecto HIDRON (PID2020-116500RB-I00/AEI / 10.13039/501100011033), y por la Consejería de Ciencia, Universidades e Innovación de la Comunidad de Madrid a través del proyecto DROMADER-CM (Y2020/NMT-6584 / SINERGICOS).

Si bien los EV no producen ningún tipo de gas contaminante en su funcionamiento, debido a la obtención de la energía eléctrica requerida pueden llegar a ser incluso más contaminante que los vehículos tradicionales de acuerdo con [2], tal y como se puede apreciar en la Figura 1. No obstante, las pilas de combustible también presentan inconvenientes como su unidireccionalidad o su reducida respuesta dinámica, por lo que demandar de ellas perfiles de carga muy exigentes, con variaciones de carga muy bruscas, puede producir fenómenos no deseados como el denominado "oxygen starvation" [3] relacionado con el flujo de aire que recorre la pila de combustible.

En [4] y [5] se presentan diferentes arquitecturas de control para optimizar el funcionamiento de las PEMFC. Estas arquitecturas tratan de asegurar que la PEMFC entregue tan solo el valor medio de la potencia de carga demandada, mientras que serán las fuentes de energía secundarias, baterías y supercondensadores, las que entregarán o almacenarán las variaciones con respecto a la potencia media. Estas arquitecturas de control se han implementado sobre el sistema de distribución de potencia (SDP) mostrado en la Figura 2, que es uno de los analizados en [6] y [7]. Este SDP es el más genérico y flexible, y el control aplicado a este SDP es fácilmente adaptable a otros SDP más específicos o reducidos.

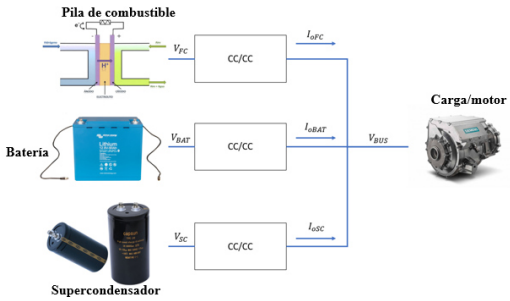

Figura 2. Esquema del sistema de distribución de potencia (SDP) general de un FCEV

En el presente trabajo se pretende estudiar diferentes estrategias de co-simulación basadas en el uso de cuatro programas diferentes, Vivado, Modelsim, Simulink y PSIM, así como la implementación en un HIL. El objetivo consiste en entender y analizar la utilidad de las herramientas y distinguir en qué situaciones puede resultar más útil utilizar una u otra.

II. Selección de la arquitectura de control

El sistema de distribución de potencia utilizado, Figura 2, consta de tres fuentes de energía y tres convertidores, sobre los que se pueden implementar diferentes arquitecturas de control. La topología seleccionada para los convertidores de potencia corresponde a reductores elevadores de cuatro interruptores (FSBB) por su versatilidad y su bidireccionalidad.

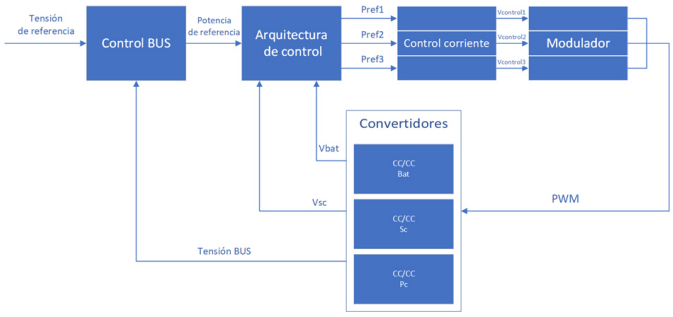

Figura 3. Estrategia de control del sistema de potencia completo

La estrategia de control general utilizada se ilustra en la Figura 3. El control de corriente y el modulador reproduce la propuesta descrita en [8].

En el estado de la técnica se pueden encontrar diferentes arquitecturas de control. Unas pretenden optimizar el consumo de hidrógeno asegurando que la pila de combustible entregue potencia en todo momento en su punto óptimo de funcionamiento, minimizando una función de coste [9]. Otras estrategias poseen varios modos de funcionamiento que se activan de acuerdo con las tensiones y corrientes de las fuentes [10] y [11]. También se encuentran otro tipo de estrategia de control, en las cuales se entrega potencia a la carga de acuerdo con las variaciones dinámicas de ésta, en lugar de hacerlo de acuerdo con estados predeterminados, [12], [13] y [14]. En [4] y [5] se analizan algunas de estas arquitecturas de control, junto con un número de estrategias originales, comparando la eficiencia y el rendimiento de todas ellas. La arquitectura seleccionada se muestra en la Figura 4, debido a sus prestaciones en cuanto al control de la carga de las fuentes secundarias, la estabilidad del bus de carga, o la manera en que funciona la pila de combustible. Esta es la arquitectura de control implementada en este artículo.

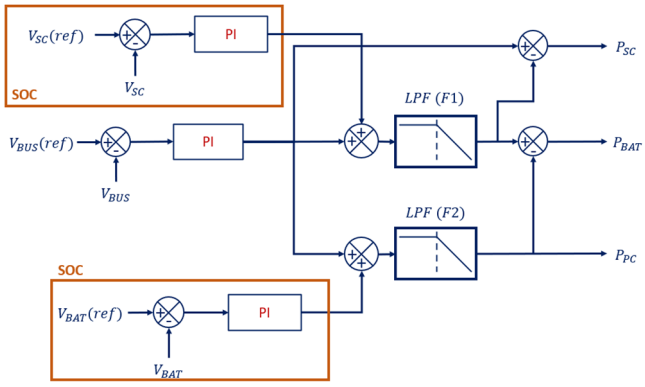

Figura 4. Arquitectura de control para la distribución de potencia de un FCEV

III. Estrategias de co-simulación

La co-simulación entre diferentes herramientas o entre hardware y software puede ser de gran utilidad para el diseñador, pudiendo valerse de las diferentes prestaciones de cada programa para diseñar el sistema. En la literatura actual existen diferentes estudios realizados con co-simulaciones y "Hardware in the loop" (HIL), [15] y [16], para el diseño del control de los convertidores de potencia. Otros estudios precisan de un gran número de programas y licencias para llevarse a cabo [17], por lo que su útilidad se encuentra limitada. En este trabajo, se muestran diferentes estrategias de co-simulación implementadas sobre control mostrada en la Figura 4.

PSIM-SimCoupler-Simulink: en esta estrategía de co-simulación la etapa de potencia se simula en PSIM, la etapa de control se implementa en Simulink, y la conexión entre ambas herramienta se realiza mediante SimCoupler, que es un módulo de PSIM que permite la comunicación con Simulink. El entorno desde donde se realiza y controla la simulación es Simulink.

PSIM-ModCoupler-Modelsim: En esta estrategia de control la etapa de potencia se simula en PSIM, el control se implementa en Modelsim, y la conexión entre ambas herramienta se realiza mediante ModCoupler, que es un módulo de PSIM que permite la comunicación con Modelsim. El entorno desde donde se realiza y controla la simulación es PSIM.

Simulink-HIL basado en SoC: En esta estrategia de co-simulación la etapa de potencia se simula en Simulink, y el control se implementa directamente en la FPGA de una Zedboard, que es un SoC fabricado por Xilinx. Para ello, Simulink ejecuta Vivado en un segundo plano generando todos los archivos necesarios para la implementación. El entorno desde donde se realiza y controla la simulación es Simulink.

En la Figura 5, se pueden apreciar resumidas las diferentes estrategias de co-simulación llevadas a cabo.

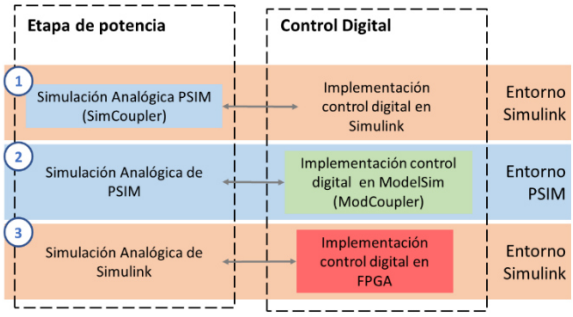

Figura 5. Estrategias de co-simulación implementadas

A. PSIM-SimCoupler-Simulink.

Para esta estrategia de co-simulación se ha discretizado el control completo mostrado en la Figura 3, descrito en profundidad en [4] y [5]. Para ello se han discretizado los reguladores mediante el método de sustitución de la transformada bilineal, en donde se sustituyen los valores de s por un valor equivalente en z.

$$R(s) = k \cdot \frac{1 + s \cdot T_i}{s \cdot T_i} \quad (1)$$

$$s \approx \frac{2}{T} \cdot \frac{z-1}{z+1} \quad (2)$$

$$R(z) = k \cdot \left(1 + \frac{T \cdot (z+1)}{2T_i \cdot (z-1)}\right) \quad (3)$$

Partiendo de la ecuación (1), correspondiente con la función de transferencia de un controlador PI, se sustituye "*s*" con (2), para obtener la función de transferencia discretizada del PI, (3). Por otra parte, se han diseñado dos filtros digitales, mediante "FilterDesigner" de MATLAB [18], necesarios para la arquitectura de control de la Figura 4. Estos filtros corresponden a un filtro paso bajo (F2) de 10Hz (4) y otro (F1) de 100Hz (5) para una frecuencia de reloj de 50kHz.

$$H(z) = 0.0000392 \cdot \frac{1 + 2 \cdot z^{-1} + 1 \cdot z^{-2}}{1 - 1.9822052 \cdot z^{-1} + 0.9823622 \cdot z^{-2}} \quad (4)$$

$$H(z) = 0.0047642 \cdot \frac{1 + 2 \cdot z^{-1} + 1 \cdot z^{-2}}{1 - 1.7954766 \cdot z^{-1} + 0.8145335 \cdot z^{-2}} \quad (5)$$

Estas ecuaciones han sido implementadas en simulink, así como el resto del control previamente diseñado, Figura 3.

Adicionalmente, se deben fijar los tipos de datos de cada operación para modificar la coma flotante por coma fija y de esta manera reducir la carga del SoC. Para comprobar el funcionamiento del sistema se usa la herramienta "SimCoupler", que permite comunicar Simulink con PSIM como se puede ver en la Figura 6. De esta manera, se puede implementar la etapa de potencia en PSIM, programa más optimizado para este tipo de simulaciones, bloque blanco, y el control se mantiene en simulink, bloque azul.

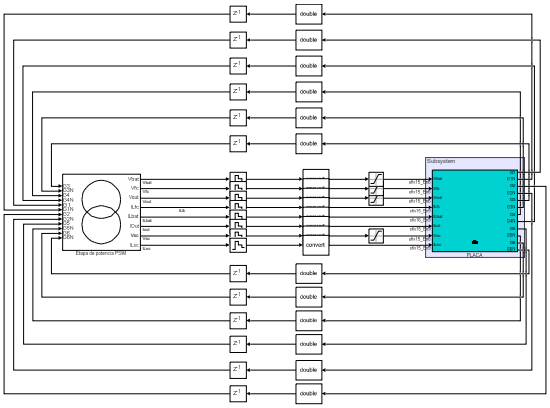

Figura 6. Implementación del control en Simulink y de la etapa de potencia en PSIM, conectados por el módulo "SimCoupler"

B. PSIM-ModCoupler-Modelsim.

En este caso, al igual que en la co-simulación anterior, se implementa la etapa de control en Simulink. A continuación, se procede a generar el código hardware de la etapa de control desde el mismo Simulink. Para ello se utiliza la herramienta "HDL Workflow advisor", en donde se debe seleccionar el tipo de SoC que se va a programar, en este caso una ZedBoard, las conexiones con los puertos de entrada y de salida, y la frecuencia del reloj. Se puede observar el flujo de diseño a seguir en la Figura 7. El punto 1 se corresponde con la configuración del diseño, la placa, conexiones de puertos de entrada y salida, y frecuencia de reloj. El punto 2 se corresponde con comprobaciones automáticas que realiza el sistema para asegurar la compatibillidad del esquemático con el diseño HDL. El punto 3 genera el código de descripción hardware y permite ajustar algunos parámetros de diseño. Finalmente, en el punto 4 se programa la FPGA, y se genera un esquemático de interfaz.

Para este tipo de co-simulación, tan solo es necesario alcanzar el punto 3, ya que se pretende co-simular el código hardware antes de su implementación final. Una vez generado el código se guarda en una carpeta. Accediendo a esta carpeta, se selecciona el archivo "main", y a continuación se introduce en el modulo de PSIM "ModCoupler" para su simulación.

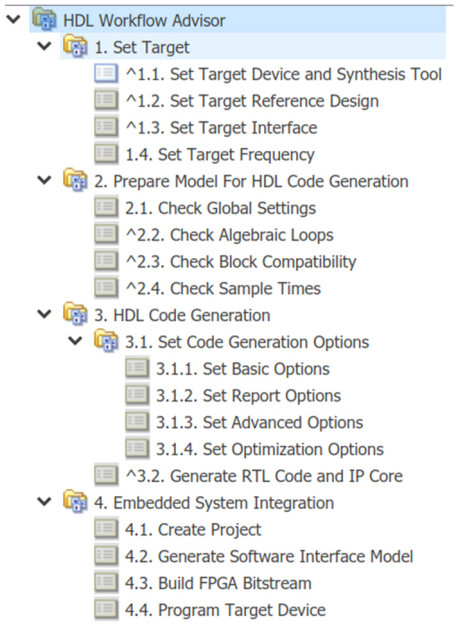

Figura 7. Flujo de diseño del "HDL Workflow Advisor"

Al abrir el módulo "ModCoupler", el archivo "top" del código generado por Simulink se introduce en el campo indicado, y automaticamente se generan los puertos de entrada y de salida del control, en este caso, las señales sensadas como puertos de entrada y las PWM en los puertos de salida. Adicionalmente simulink genera tres puertos más, un reloj, un reset, y un enable. Es importante introducir el mismo reloj en el modulo "ModCoupler" y en PSIM, para asegurar la sincronizaciónh entre ellos. Asimismo es preciso introducir un escalón en el reset para que el sistema arranque, es decir, el pulso debe estar a nivel bajo y tras unos pocos ciclos de reloj debe cambiar a nivel alto.

Por último, antes de simular es necesario cambiar los datos de coma flotante, con la que funciona PSIM, a coma fija con la que se ha diseñado el control. Para ello, se multiplica el valor en coma fija por un múltiplo de dos y redondea el resultado, para asegurar el número de decimales esperado.

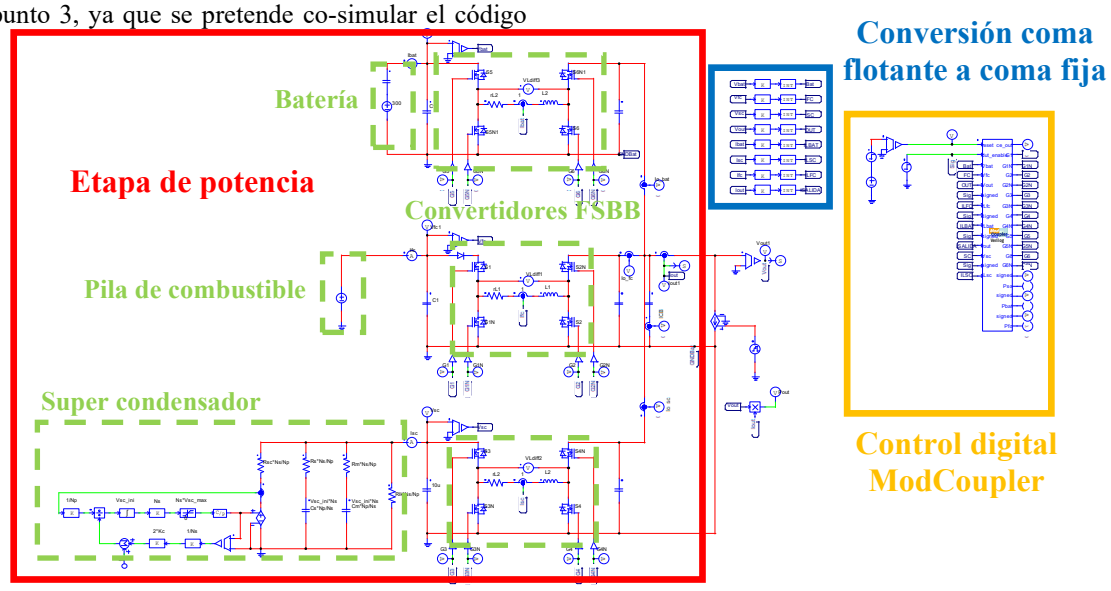

Figura 8. Etapa de potencia implementada en PSIM, etapa de control en Simulink, conectados mediante el módulo "ModCoupler"

En la Figura 8, se representa el esquema de la co-simulación entre PSIM y ModelSim. El control digital se simula en un segundo plano en ModelSim y muestra una ventana con todos los valores internos del control digital, como se ilustra en la Figura 9.

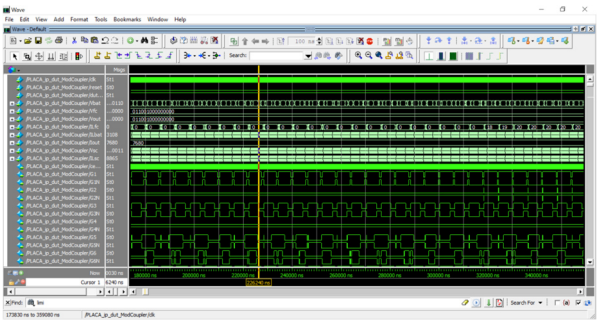

Figura 9. Ventana de simulación de ModelSim

C. *Simulink-HIL basado en SoC.*

En último lugar, se implementa el diseño del control del SDP en el SoC seleccionado, en concreto una ZedBoard de Xilinx. Para este paso, es necesario alcanzar el punto 4 del flujo de diseño (Figura 7) que programa el SoC. Es necesaio hacer una importante variación en el punto 1.3 en el que se fijan los puertos de entrada y de salida. En primer lugar, es necesario configurarlos todos como puerto AXI, ya que estos valores serán compartidos entre Simulink (software implementado sobre ordenador) y el SoC (hardware). En segundo lugar, para este ensayo es necesario modificar el tipo de simulación a "Cosimulación" en lugar de "Free-running" que aparece por defecto. Este cambio se debe a que la etapa de potencia, que se implementa en Simulink, funciona a una velocidad menor que la FPGA del SoC. Para igualar las velocidades de operación de Simulink y de la FPGA es preciso bloquear la FPGA durante el tiempo necesario para que simulink pueda realizar las operaciones y devuelva el siguiente dato a la FPGA.

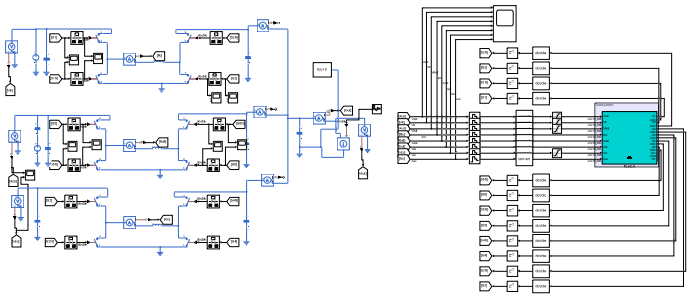

Figura 10. Etapa de potencia generada en Simulink y control introducido en la FPGA de la Zedboard de Xilinx

En este tipo de co-simulación, Simulink-SoC, Simulink no permite realizar co-simulaciones de hardware y PSIM, a través de SimCopuler, por lo que no es posible simular la etapa de potencia en PSIM. En su lugar es neceario implementar la etapa de potencia directamente en Simulink, tal y como se muestra en la Figura 10, aunque es un software menos optimizado para este tipo de operaciones.

IV. RESULTADOS DE CO-SIMULACIÓN

Todos los tipos de co-simulación se han implementado para comprobar su correcto funcionamiento. Para la simulación del SDP se ha introducido un perfil de carga con una demanda dinámica exigente, con el fin de comprobar que en todos los casos la respuesta del control es adecuada. Los resultados obtenidos con las diferentes co-simulaciones se han comparado con los resultados de una simulación realizada íntegramente en PSIM, Figura 11, y que corresponde al primer tramo de los resultados mostrados en [5].

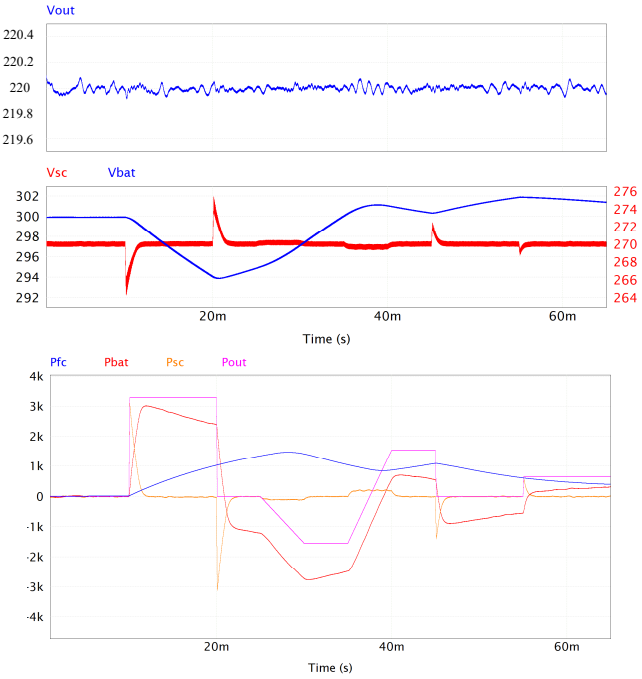

Figura 11. Resultados de referencia obtenidos íntegramente mediante PSIM. Superior) Tensión de salida. Media) Rojo: Tensión del supercondensador, Azul: Tensión de la batería. Inferior) Rosa: Potencia de salida, Rojo: Potencia de batería, Naranja: Potencia del supercondensador, Azul: Potencia de pila de combustible

En la Figura 11, en los dos gráficos superiores, se indican las tensiones más significativas del sistema, tensión de salida, tensión de la batería y tensión del supercondensador. En el gráfico inferior, se observa la potencia entregada por la pila de combustible (azul), potencia de la batería (rojo) y potencia del supercondensador (naranja), como respuesta a la potencia demandada por la carga (morado). Se puede apreciar como la respuesta coincide con lo esperado según la dinámica y la relación potencia frente energía de cada fuente. El supercondensador solo actua cuando se produce los flancos de los escalones de carga, la pila de combustible entrega el valor medio de la carga, y la batería trabaja en un rango dinámico intermedio.

A. *Co-simulación PSIM-SimCoupler-Simulink.*

La primera estratégia de co-simulación comunica Simulink con PSIM, desde donde se simula la etapa de potencia, a través del módulo SimCoupler. Para la realización de esta simulación, como se comentó anteriormente, ha sido necesario realizar la discretización completa del control. En este sentido, se puede comprobar que la tensión de salida se regula de manera muy similar al caso de referencia, Figura 11.

En la Figura 12, en el gráfico superior, se puede comprobar que la tensión de salida tiene una respuesta similar a lo esperado, aunque con un mayor nivel de rizado durante la aplicación del primer escalón de potencia. Esto es debido principalmente a la gestión de la energía que realiza la batería, que en esta co-simulación aporta algo más de la necesaria. Se puede comprobar que las tensiones de las fuentes secundarias responden de manera similar a lo simulado previamente. Por último, en la gráfica inferior, se puede apreciar como la pila de combustible (azul) sigue entregando el valor medio de la potencia demandada (rosa), el supercondensador (naranja)

entrega únicamente las variaciones más bruscas, y la batería (rojo) trabaja en un rango dinámico intermedio.

Figura 12. A. Co-simulación PSIM-SimCoupler-Simulink. Superior) Tensión de salida. Media) Rojo: Tensión del supercondensador, Azul: Tensión de la batería. Inferior) Rosa: Potencia de salida, Rojo: Potencia de batería, Naranja: Potencia del supercondensador, Azul: Potencia de pila de combustible

B. Co-simulación PSIM-ModCoupler-Modelsim.

La segunda simulación se corresponde con la co-simulación entre PSIM y ModelSim, utilizando el módulo de PSIM "ModCoupler". Tras simular el sistema se obtiene el resultado mostrado en la Figura 13.

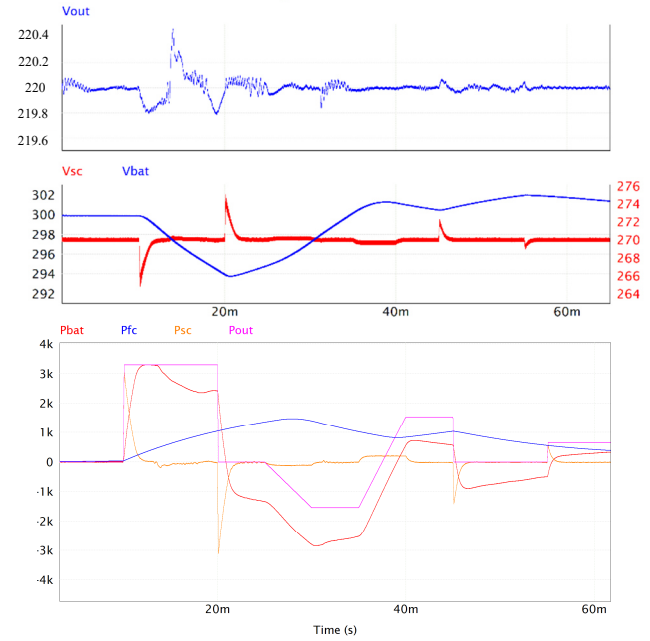

Figura 13. Co-simulación PSIM-ModCoupler-Modelsim. Superior) Tensión de salida. Media) Rojo: Tensión del supercondensador, Azul: Tensión de la batería. Inferior) Rosa: Potencia de salida, Rojo: Potencia de batería, Naranja: Potencia del supercondensador, Azul: Potencia de pila de combustible

Se puede apreciar como el funcionamiento del sistema sigue las pautas esperadas: la tensión de salida se mantiene estabilizada a la tensión de referencia las tensiones de las fuentes secundarias responden de la manera esperada, y cada fuente aporta la potencia necesaria en función de su dinámica. Otra vez en esta simulación, la respuesta de la batería presenta un aporte de potencia algo diferente, especialmente durante el primer escalón de potencia. Este extra de energía aportado por la batería provoca un mayor rizado en la tensión de salida durante los primeros 25ms.

Por otro lado, aunque el rango de tiempo representado es el mismo, el tiempo necesario para realizar la simulación aumenta significativamente, ya que Modelsim es un programa de más bajo nivel y da acceso a un mayor número de señales internas, lo que conlleva una mayor cantidad de datos, que afecta al tiempo de ejecución. Al ser un programa que trabaja a un nivel menor de abstracción permite obtener información más fiable del funcionamiento final del sistema, ya que tiene en cuenta los retardos entre procesos.

En cualquier caso, este tipo de co-simulación es especialmente útil en la fase previa a la implementación del código de control en la FPGA, ya que permite entender y comprobar el funcionamiento interno del código.

C. Co-simulación Simulink-HIL basado en SoC.

Por último, se ha co-simulado el SDP implementando el control en un HIL basado en un SoC (ZedBoard de Xilinx) y la etapa de potencia se ha simulado en Simulink. Los resultados obtenidos se ilustran en la Figura 14. Gracias a esta simulación se ha comprobado que la implementación en la FPGA es correcta, como se puede apreciar en las distintas gráficas de la Figura 14.

Figura 14. Co-simulación Simulink-HIL basado en SoC. Superior) En orden descendente Tensión de salida, tensión de batería, tensión del supercondensador. Inferior) Morada: Potencia de salida, Rojo: Potencia de batería, Naranja: Potencia del supercondensador, Azul: Potencia de pila de combustible

Esta simulación permite comprobar el retardo real en el control de la FPGA, así como comprobar los recursos que serán necesarios para la implementación final. Adicionalmente, esta simulación es útil si se pretende comprobar el funcionamiento de los puertos físicos del SoC.

Los resultados obtenidos están en línea con las co-simulaciones anteriores, con un menor rizado máximo en la tensión de salida, y un mejor control de la potencia proporcionada por la batería.

Para este tipo de co-simulación es crítico optimizar las comunicaciones entre hardware y software, para así reducir el tiempo de simulación, ya que, en la co-simulación realizada, el elemento más lento del sistema es el bus de comunicación entre el software y el hardware. Los tiempos de co-simulación deberían ser menores con otra estructura de comunicaciones, que elimine el actual puerto USB utilizado.

D. *Comparativa.*

Con el fin de analizar el comportamiento de cada simulación se han comparado los resultados que se obtienen con cada una de ellas, Tabla 1. Para ello se muestra los valores máximos y mínimos de la tensión de salida, los valores máximos y mínimos de todas las potencias de salida, y el tiempo necesario para realizar la simulación.

Tabla 1. Comparativa entre las distintas co-simulaciones

	$V_o\ (V)$	$P_{pc}\ (kW)$	$P_{bat}\ (kW)$	$P_{sc}\ (kW)$	$t_{sim}\ (min)$
PSIM	219,9 a 220,1	0 a 1,5	-2,9 a 3	-3 a 3,3	1
PSIM-Simulink	219,8 a 220,25	0 a 1,5	-2,8 a 3	-3 a 3,3	9,6
PSIM-Modelsim	219,8 a 220,45	0 a 1,5	-2,9 a 3,3	-3 a 3,3	106
Simulink-HIL	219,7 a 220,1	0 a 1,5	-2,9 a 3	-3 a 3,3	510

V. CONCLUSIONES

El correcto control hardware así como su implementación son fundamentales para el buen funcionamiento del sistema de distribución de potencia de cualquier aplicación. En este artículo, se ha mostrado y comparado el funcionamiento del control del SDP de un vehículo eléctrico híbrido generado mediante diferentes tipos de co-simulación.

En primer lugar, la co-simulación entre PSIM y simulink es especialmente util si se diseña el control del sistema en simulink, ya que permite generar código hardware de manera automática en una siguiente etapa. En este caso, este tipo de co-simulación permite utilizar un programa optimizado para la simulación de la etapa de potencia, PSIM, a la vez que el control se implementa en Simulink. Seguidamente, la co-simulación entre PSIM y ModelSim es muy útil para comprender y comprobar el funcionamiento real que tendrá el control implementado en la FPGA, y evitar que se introduzcan retrasos que desestabilicen el sistema, así como mejorar y reducir los tiempos de depuración del código o del control. Adicionalmente, este tipo de co-simulación puede servir como banco de pruebas para generar código hardware manualmente. Además, el utilizar esta modalidad de co-simulación puede evitar tener que generar un banco de pruebas real que incluya la etapa de potencia, que suele ser costosa en dinero y tiempo, y se puede depurar el código de control de una manera más rápida y simple.

Por último, la modalidad de co-simulación hardware-software entre el SoC y Simulink permite comprobar la funcionalidad de los propios puertos físicos de entrada y de salida de la placa, así como del control y su actuación sobre la etapa de potencia simulada en Simulink. En este tipo de co-simulación es crítico reducir el tiempo de las comunicaciones entre la FPGA y Simulink, con el fin de evitar incrementar los tiempos de simulación.

En general, las respuestas obtenidas en todas las simulaciones han sido bastante similares, aunque habría que seguir profundizando en las variaciones observadas en la potencia proporcionada por la batería, que a su vez afecta a la tensión de salida, especialmente ante escalón de la potenicia de salida. También, hay que mejorar los tiempos de simulación, especialmente en las co-simulaciones que implementan código hardware.

REFERENCIAS

[1] O. Bethoux, «Hydrogen Fuel Cell Road Vehicles: State of the Art And Perspectives,» MDPI, Energies, vol. 13, nº 5843, 2020.

[2] Parlamento Europeo, «Emisiones de CO2 de los coches: hechos y cifras (infografía),» 22 Marzo 2019. [En línea]. Available: https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20190313STO31218/emisiones-de-co2-de-los-coches-hechos-y-cifras-infografia.. [Último acceso: 11 Julio 2021].

[3] H. Ramírez-Murillo, C. Restrepo, J. Calvente, A. Romero y R. Giral, «Energy Managment DC System Based on Current-Controlled Buck-Boost Modules,» IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, vol. 5, nº 5, 2014.

[4] V. Díaz , A. Barrado, A. Lázaro y C. Fernandez, «Análisis de estrategias de control aplicadas al sistema de distribución de potencia de vehículos eléctricos con múltiples fuentes de energía,» Seminario Anual de Automática Electrónica industrial e Instrumentación (SAAEI), 2021.

[5] V. Díaz, A. Barrado, A. Lázaro y C. Fernandez, «Control strategies analysis used in power distribution systems of electric vehicles with multiple energy sources,» IEEE 15th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), pp. 1-7, 2021.

[6] C. Raga, A. Barrado, H. Miniguano, A. Lázaro, I. Quesada y A. Martín-Lozano, «Analysis and sizing of power distribution architectures applied to fuel cell based vehicles,» MDPI Energies, vol. 11, nº 10, pp. 1-30, Sep 2018.

[7] H. Ramírez-Murillo, C. Restrepo, T. Konjedic, J. Calvente, A. Romero, C. R. Baier y R. Giral, «An Efficiency Comparison of Fuel-Cell Hybrid Systems Based on the Versatile Buck-Boost Converter,» IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, vol. 33, nº 2, pp. 1237-1246, Feb 2018.

[8] H. Miniguano, «Sistemas de Gestión de Energía en Vehículos Eléctricos,Modelado e Identificación de Baterías de Ion-Litio y Supercondensadores para su aplicación al Vehículo Eléctrico,» Tesis doctoral Universidad Carlos III de Madrid (UC3M), pp. 113-114, 2019.

[9] A. Serpi y M. PPorru, «A Multi-Stage Management System for Multi-Source Hybrid Electric Vehicles,» IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, vol. 1, pp. 5901-5908, 2019.

[10] H. Ramírez-Murillo, C. Restrepo, J. Calvente , A. Romero y R. Giral, «Energy Managment of a Fuel-Cell Serial-Parallel Hybrid System,» IEEE TRANSACTION ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, vol. 62, nº 8, pp. 5227-5235, 2015.

[11] J. P. F. Trovão, V. Santos, C. Henggeler, P. G. Pereirinha y H. M. Jorge, «A Real-Time Energy Management Architecture for Multisource Electric Vehicles,» IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, vol. 62, nº 5, pp. 3223-3233, 2015.

[12] S. B. E. a. M. F. M. J. Snoussi, «Sizing and Control of Onboard Multisource Power System for Electric Vehicle,» 2019 19th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), pp. 347-352, 2019.

[13] P. Thounthoga, S. Rael y B. Davat, «Energy management of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power source,» Journal of power sources, vol. 193, pp. 376-385, 2009.

[14] T. Azib, C. Larouci, A. Chaibet y M. Boukhnifer, «Online Energy Management Strategy of a Hybrid Fuel Cell/Battery/Ultracapacitor Vehicular Power System,» IEEJ TRANSACTIONS ON ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING, vol. 9, pp. 548-554, 2014.

[15] L. Bottaccioli, «A Flexible Distributed Infrastructure for Real-Time Cosimulations in Smart Grids,» IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 13, nº 6, pp. 3265-3274, 2017.

[16] M. P.-G. M. G.-V. J. L. M. S. A. Fernández-Álvarez, «HW/SW Co-Simulation System for Enhancing Hardware-in-the-Loop of Power Converter Digital Controllers,» IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 5, nº 4, pp. 1779-1786, 2017.

[17] P. Palensky, A. Van der Meer, Lopez, A. Joseph y K. Pan, «Applied Cosimulation of Intelligent Power Systems: Implementing Hybrid Simulators for Complex Power Systems,» IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 11, nº 2, pp. 6-21, 2017.

[18] MathWorks, «Introduction to Filter Designer,» MatLab, 2022. [En línea]. Available: https://es.mathworks.com/help/signal/ug/introduction-to-filter-designer.html. [Último acceso: 25 Febrero 2022].