

## MODELADO HÍBRIDO PARA LA SIMULACIÓN EFICIENTE DE FUENTES CONMUTADAS.

Gustavo Migoni\* Federico Bergero\* Ernesto Kofman\*

\* CIFASIS-CONICET – FCEIA-UNR -  
migoni,bergero,kofman@cifasis-conicet.gov.ar

**Resumen:** En este trabajo se propone una metodología novedosa para el modelado y la simulación eficiente de convertidores de continua en continua. La metodología se basa en utilizar modelos conmutados durante los transitorios y modelos promediados en las situaciones de régimen, obteniendo así simulaciones precisas y rápidas, y conmutando entre ambos tipos de modelos de manera automática. Además de describir la metodología desarrollada, se presenta una implementación de la misma en una librería de convertidores en el lenguaje Modelica y se analizan resultados de simulación, donde se puede observar para distintas topologías circuitales una gran ventaja computacional.

**Palabras Claves:** Fuentes Conmutadas, Modelica, Simulación

### 1. INTRODUCCIÓN

Los convertidores de continua en continua son dispositivos electrónicos que se encuentran en innumerables equipos y sistemas que requieren regular voltajes continuos. Estos dispositivos funcionan conmutando ciertas llaves a una gran frecuencia (del orden de las decenas de KHz).

Debido a la complejidad que tiene la dinámica impuesta por las conmutaciones, tanto para el diseño y el dimensionamiento de los componentes como para el ajuste de los sistemas de control de las mismas, resulta imprescindible simular estos sistemas.

Sin embargo, la simulación de las fuentes conmutadas trae aparejadas varias dificultades (Mohan *et al.*, 1994). Principalmente, las conmutaciones implican discontinuidades en las ecuaciones diferenciales del modelo, ante las cuales los algoritmos de integración numérica deben detenerse, encontrar exactamente el punto en el que ocurren y reiniciar la simulación desde dicho punto (Cellier and Kofman, 2006). En consecuencia, aún utilizando algoritmos específicos muy eficientes (Migoni *et al.*, 2015), las simulaciones suelen ser muy lentas.

Para evitar este problema, un enfoque muy utilizado consiste en utilizar modelos promediados donde los elementos de conmutación son reemplazados por parámetros continuos (Maksimović *et al.*, 2001). Dichos modelos pueden simularse de manera muy rápida, pero a costa de sacrificar detalle y precisión. Por un lado, estos modelos no muestran el ripple de las corrientes y tensiones y generalmente pierden validez durante los transitorios, frente a condiciones de conducción discontinua y frente a cambios grandes de régimen. Si bien existen modelos que consideran estos casos (Davoudi *et al.*, 2006), los mismos son complejos y difíciles de parametrizar para un caso práctico en el cual lo que interesa es hacer una simulación rápida.

En este trabajo proponemos una metodología que utiliza modelos conmutados durante los transitorios y promediados en las situaciones de régimen, con una estrategia automática de conmutación entre ambos enfoques totalmente transparente al usuario. Además, durante la simulación del modelo conmutado se realiza una parametrización del modelo promediado, lo que garantiza que al pasar a régimen dicho modelo será correcto independientemente del punto de trabajo y del

tipo de conducción (continua o discontinua) correspondiente.

## 2. PRELIMINARES

### 2.1 Modelos de fuentes conmutadas

Las fuentes conmutadas de continua en continua son dispositivos electrónicos que convierten una tensión continua en otra diferente mediante componentes que conmutan a alta frecuencia. Debido a su eficiencia, las mismas se utilizan en gran cantidad de aplicaciones. La mayor parte de las topologías utilizadas se derivan de los siguientes tres circuitos no aislados:

- Convertidor Buck: que reduce la tensión de entrada ( $V_{out} < V_{in}$ ).
- Convertidor Boost: que incrementa la tensión de entrada ( $V_{out} > V_{in}$ ).
- Convertidor Buck-Boost: que puede aumentar o disminuir la tensión (el circuito Cúk es una variante de este convertidor).

La tensión de salida en todos los casos se regula controlando la fracción de tiempo que las llaves están en estado de conducción, es decir, controlando el *ciclo de trabajo*.

Un esquema simplificado del convertidor Buck se muestra en la Fig.1.

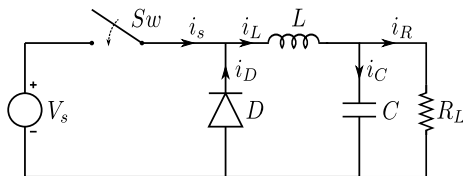


Fig. 1. Buck converter circuit

### 2.2 Modelos promediados

El objetivo de los modelos promediados (AVM) (Chiniforoosh *et al.*, 2010) es sustituir las células de conmutación discontinuas con bloques continuos que representan el comportamiento promedio de la célula de conmutación dentro de un intervalo de conmutación.

Existen diversos métodos para obtener modelos promediados de convertidores DC-DC. La técnica que se utilizará en este trabajo consiste en promediar directamente las celdas de conmutación tal como se ve en la Fig.2 y se denomina *switching cell average model* o *promediación circuital*.

En esta técnica, los componentes comunes de los convertidores tales como resistencias inductancias y capacitores se mantienen inalterados en el proceso de promediación mientras que los componentes conmutados como llaves y diodos

se reemplazan por elementos que no conmutan y exhiben en sus terminales los mismos valores de corriente y tensión que los valores medios de los componentes originales.

Para lograr este objetivo, se sustituyen los pares de interruptores activos/pasivos (llaves controladas/diodos) por fuentes controladas que dependen del ciclo de trabajo del control de la llave. En la parte derecha de la Fig.2 puede verse la celda equivalente correspondiente al par llave/diodo de la parte izquierda de esta figura.

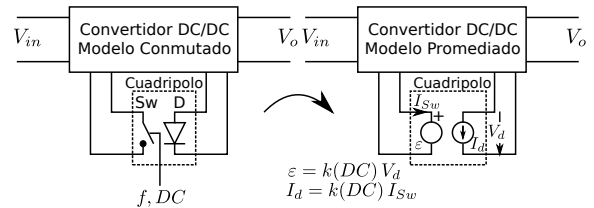


Fig. 2. Modelo Promediado equivalente

El reemplazo de las células de conmutación por fuentes controladas requiere parametrizar una función  $k(DC)$ , dependiente del *duty cycle*. Para el modo de conducción continuo (CCM), esta parametrización puede realizarse analíticamente de manera relativamente sencilla. En el caso de conducción discontinua, la parametrización es en general muy compleja.

### 2.3 El lenguaje Modelica

Modelica (Fritzson, 2015) es un lenguaje orientado a objetos de modelado de sistemas continuos. La estructura de los modelos se describe generalmente gráficamente a través de conexiones entre componentes y el comportamiento de éstos se expresa utilizando ecuaciones acausales (sin indicar flujo de entrada-salida). El lenguaje permite también describir sistemas híbridos especificando los cambios de estado mediante algoritmos.

La naturaleza orientado a objetos y la descripción acausal de Modelica facilita la composición de modelos multi-dominio y la organización y reutilización de código en librerías. Un ejemplo es la *Modelica Standard Library*, un repositorio de componentes de distintos dominios de la física (eléctrico, mecánicos, hidráulico, térmicos, etc.) a partir del cual se pueden desarrollar nuevos modelos.

Estas ventajas y el hecho de que se trata de un lenguaje abierto, han transformado a Modelica en el lenguaje estándar moderno de modelado y simulación en muchas aplicaciones de la Ingeniería. De hecho, Modelica se utiliza actualmente para modelar y simular fuentes conmutadas, contando con una implementación de SPICE en el lenguaje (Urquía *et al.*, 2005).

Existen distintas herramientas de modelado y simulación Modelica tales como OpenModelica, Dymola, Wolfram System Modeler, entre otras.

### 3. ESTRATEGIA DE MODELADO HÍBRIDO

A continuación describiremos la metodología desarrollada y su implementación.

#### 3.1 Esquema general

La metodología propuesta consiste en construir cada modelo usando dos sub-modelos: uno que representa la fuente con los elementos de conmutación y otro promediado que representa la evolución del valor medio de sus variables.

Teniendo en cuenta que, como muestra la Fig.2, ambos sub-modelos difieren únicamente en que en los primeros se reemplazan las llaves por fuentes de tensión controladas y los diodos por fuentes de corriente controladas, la idea es que los sub-modelos compartan los almacenadores de energía de los convertidores.

El esquema general es entonces el que se muestra en la Fig.3, donde además se pone en evidencia la existencia de una estrategia de conmutación encargada de realizar el cambio entre los modelos.

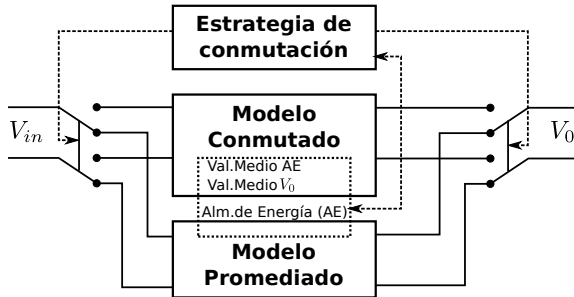


Fig. 3. Esquema del modelado híbrido de convertidores DC/DC

#### 3.2 Sub-Modelo Conmutado

El sub-modelo conmutado se corresponde con el circuito que incluye llaves y diodos, bajo un esquema similar al de la Fig.1.

#### 3.3 Sub-Modelo Promediado

Este sub-modelo reemplaza las llaves y diodos por fuentes controladas que responden a la siguiente ley:

$$\begin{aligned} V_{Sw}(t) &= k(DC) \cdot V_d(t) \\ I_d(t) &= k(DC) \cdot I_{Sw} \end{aligned} \quad (1)$$

donde  $V_{Sw}$  e  $I_{Sw}$  son la tensión y corriente en la fuente controlada que reemplaza la llave, mientras

que  $V_d$  e  $I_d$  son las correspondientes a la fuente que reemplaza al diodo, como se muestra en la Fig.2.

La función  $k(DC)$  que vincula las amplitudes de estas fuentes con el *duty cycle* utiliza una expresión

$$k(DC) = k_1 \cdot \frac{1 - DC}{DC} \quad (2)$$

donde  $k_1$  es un parámetro que se determina durante la simulación en el modo conmutado de manera tal que los valores medios de las tensiones y corrientes en el diodo y la llave coincidan con los de las fuentes respectivas del modelo promediado.

Llamando  $\bar{V}_{Sw}$  y  $\bar{I}_{Sw}$  a los valores medios de la tensión y corriente en el modelo conmutado, de acuerdo a las Ecs.(1) y (2) debe verificarse,

$$\bar{V}_{Sw} = k_1 \cdot \frac{1 - DC}{DC} \cdot \bar{V}_d$$

de donde, conocido el *duty cycle* y los valores medios de tensión, se obtiene

$$k_1 = \frac{\bar{V}_{Sw}}{\bar{V}_d} \cdot \frac{DC}{1 - DC} \quad (3)$$

De esta manera, el modelo promediado se parametriza automáticamente mientras se utiliza el modelo conmutado. Esto permite que la ganancia de las fuentes controladas sea correcta en todos los modos de operación.

#### 3.4 Estrategia de conmutación

La estrategia de conmutación selecciona el modelo a utilizar de acuerdo al estado transitorio o de régimen permanente que detecta.

Inicialmente, se asume que el estado es transitorio y por lo tanto se utiliza el modelo conmutado. En este modo de operación, en cada período de las llaves, el algoritmo calcula los valores medios de las variables de estado asociadas a los almacenadores de energía (inductancias y capacitores). Llamando  $\bar{X}_i(k)$  al valor medio de la  $i$ -ésima variable de estado en el  $k$ -ésimo período, la condición

$$|\bar{X}_i(k) - \bar{X}_i(k-1)| < ToP_i; \quad i = 1, \dots, n$$

implica que ninguna variable de estado cambió más que el umbral preestablecido  $ToP_i$ . Al cumplirse esto, entonces, el algoritmo decide que se debe pasar al modelo promediado. De todas maneras, este pasaje no se realiza inmediatamente, sino que se espera que la tensión de salida de la fuente cruce por su valor medio para evitar transitorios artificiales.

Al pasar al modelo promediado se guardan los valores medios de las variables de estado en el período  $k_{sw}$ , previo a la conmutación:  $\bar{X}_i(k_{sw})$ ,

y se utiliza dicho modelo mientras se verifique la condición

$$|X_i(t) - \bar{X}_i(k_{sw})| < ToS_i; i = 1, \dots, n$$

es decir, mientras el valor de las variables no difiera del último valor medio calculado en más que un umbral preestablecido  $ToS_i$ . Cuando esta condición no se cumple más, el algoritmo decide que se debe volver al modelo conmutado.

Al igual que antes, este pasaje no se realiza de forma inmediata sino que se realiza en el próximo instante que difiera en un número entero de periodos del instante en que se realizó la última conmutación, para evitar así defasajes en las señales.

Los umbrales  $ToP_i$  y  $ToS_i$  que determinan la conmutación entre ambos modelos se calculan como una fracción de la amplitud de ripple de las respectivas variables de estado. Esto es, llamando  $R_i$  a la amplitud de ripple de  $X_i$  medida en el modelo conmutado, resulta

$$ToP_i = E_S \cdot R_i; ToS_i = E_P \cdot R_i;$$

y en principio  $E_S$  debe tener un valor pequeño para pasar al modelo promediado cuando se alcanza efectivamente una situación de régimen mientras que  $E_P$  puede tomar valores más grandes para salir del modelo conmutado cuando las variaciones de los valores promedios son del orden del ripple.

En las Fig.4 y 5 se muestra la evolución de la corriente en la bobina de un convertidor DC-DC tipo Buck, donde se puede verificar el comportamiento antes descrito respecto de las condiciones de cambio de modelo.

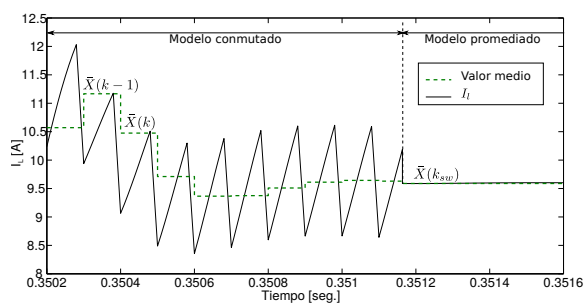


Fig. 4. Corriente en el convertidor Buck al conmutar del modelo conmutado al promediado

### 3.5 Implementación en Modelica

En base a la estrategia de modelado híbrido descripta, se desarrolló una librería de fuentes conmutadas en el lenguaje Modelica. La librería cuenta con modelos de cinco clases de fuentes: Buck, Boost, Cuk, Buck-Boost, una variante bidireccional del circuito Boost. Estos modelos, desarrollados en base al paquete de modelos eléctricos de la librería estándar de Modelica,

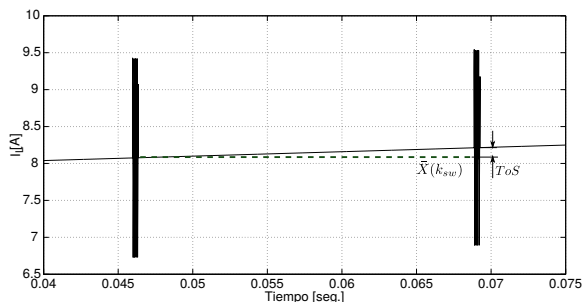


Fig. 5. Corriente en el convertidor Buck al conmutar del modelo promediado al conmutado

pueden utilizarse como parte de circuitos y modelos más complejos.

Las distintas fuentes de la librería fueron desarrolladas explotando la orientación a objetos del lenguaje, extendiendo una clase base (**HybridConverter**) que implementa la estrategia de conmutación antes presentada. Para esto, dicha clase accede a los almacenadores de energía de la fuente midiendo los valores medios de sus señales y realiza la conmutación entre el modelo conmutado y el promediado.

Además del uso de esta clase base, el modelo de cada fuente agrega llaves selectoras que, de acuerdo a su posición, conectan los elementos de conmutación o las fuentes controladas al resto del circuito, como se muestra en la Fig.6.

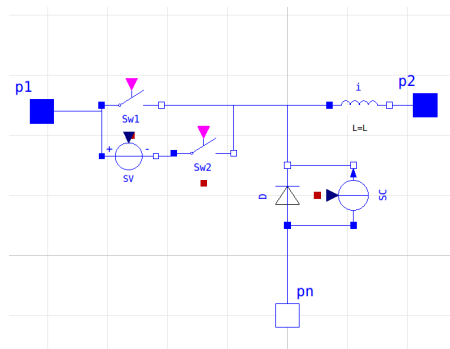


Fig. 6. Fuente Buck híbrida

De esta manera, los dos modos *conviven* en el mismo modelo. En el modo conmutado la llave **sw1** conmuta a una frecuencia de 10 KHz, la llave **sw2** se encuentra abierta y la fuente de corriente SC desactivada (con corriente de salida 0 amperes). En modo promediado la llave **sw1** queda abierta y no conmuta más, la llave **sw2** se cierra conectado la fuente de voltaje SV y la fuente de corriente SC comienza a conducir una corriente igual al valor medio.

Además de los modelos híbridos de las cinco fuentes mencionadas, la librería contiene los modelos conmutados puros de las mismas fuentes, lo que permite realizar comparaciones.

#### 4. EJEMPLOS Y RESULTADOS

En esta sección se muestran los resultados de simulación comparando la performance obtenida al simular las distintas topologías de convertidores DC-DC de la librería desarrollada utilizando modelos conmutados puros y modelos híbridos. Los experimentos fueron realizados bajo las siguientes condiciones:

- Las simulaciones se hicieron en el entorno de simulación WolframSystemModeler v4.2.0 corriendo en un sistema operativo Linux.
- Se utilizó el solver DASSL con una tolerancia de  $1e^{-6}$ .
- Se fijó en 1 segundo el tiempo final de simulación.
- La PC utilizada posee una CPU Intel(R) Core(TM) i3-2350M CPU @ 2.30GHz
- La referencia de ciclo de trabajo utilizada en todos los casos puede verse en la Fig.??.
- Se utilizaron frecuencias de conmutación de 10KHz para la Buck y la Buck-Boost, 50KHz en la Cuk y 100KHz en las Boost. Para los capacitores e inductancias utilizadas en los modelos, estas frecuencias permiten obtener niveles de ripple comparables.
- Los umbrales para conmutar entre modelos se fijaron en  $E_p = 60\%$  y  $E_s = 3\%$ .
- El perfil del ciclo de trabajo DC y de la carga resistiva  $R_L$  utilizadas es:

$$DC = \begin{cases} 0.65 + 0.5t & t < 0.1 \\ 0.7 & 0.1 \leq t < 0.15 \\ 0.4 & 0.15 \leq t < 0.35 \\ 0.8 & 0.35 \leq t < 0.5 \\ 1.55 - 1.5t & 0.5 \leq t < 0.6 \\ 0.65 & 0.6 \leq t \end{cases}$$

$$R_L = \begin{cases} 1\Omega & t < 0.65 \\ 100\Omega & 0.65 \leq t \end{cases}$$

Las condiciones de variación del ciclo de trabajo utilizadas no son favorables para los modelos híbridos ya que, al haber cambios frecuentes, el modelo no puede permanecer mucho tiempo operando en el modo promediado. Esto se hizo así intencionalmente para mostrar las ventajas obtenidas aún en estas condiciones.

En la Figura 7 puede verse la evolución de la tensión de salida  $V_{out}$  del convertidor Buck obtenida con modelado híbrido y la obtenida con el modelo conmutado.

Vemos que el resultado de simulación obtenido con ambos modelos se corresponde perfectamente, difiriendo solamente en que el modelo híbrido no provee información del ripple durante los instantes que utiliza el modelo promediado. No obstante, como que solo se permanece en el modelo promediado mientras no hayan grandes cambios el punto de operación de las fuentes, la

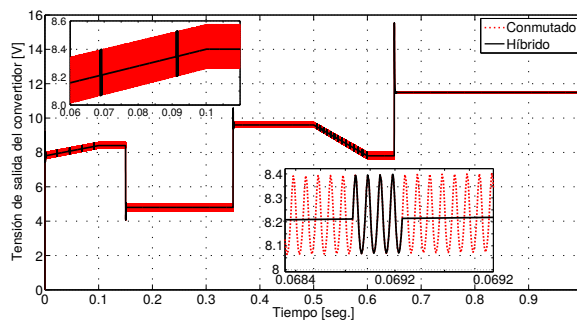


Fig. 7. Evolución de  $V_{out}$  en el convertidor Buck.

amplitud del ripple no cambiará apreciablemente respecto a la obtenida con el modelo conmutado de modo que no se pierde información respecto al ripple. En la parte superior izquierda e inferior derecha hay ampliaciones de las trayectorias que permiten ver la conmutación entre ambos modos. En la primera de ellas se puede ver que, aún cuando la variable de salida está cambiando, si la evolución es lenta, el modelo híbrido obtiene ventajas respecto al conmutado. En la segunda, se verifica que al conmutar entre los submodelos no se producen transitorios y que el ripple obtenido con ambos modelos se corresponde.

Además, a partir del instante  $t = 0.65$  la fuente entra en modo de conducción discontinuo y como se ve en la Figura 8 el resultado de simulación obtenido con el modelo híbrido y conmutado coinciden perfectamente. Notar que durante este transitorio, se selecciona automáticamente el modelo conmutado ya que se detecta que hay cambios significativos en los valores medios de las variables del sistema. Eso no se habría logrado de haber utilizado un modelo promediado simple. La conducción discontinua de la fuente se evidencia en la evolución de  $k_1$  en esta figura.

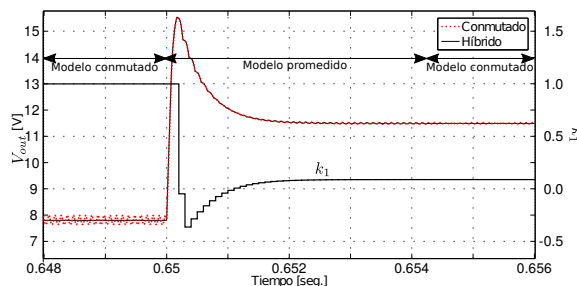


Fig. 8. Evolución de  $V_{out}$  en el convertidor Buck.

Si bien por razones de espacio no se muestran las trayectorias obtenidas con las otras fuentes, en todos los casos se observaron evoluciones similares, sin que haya nunca errores apreciables entre las trayectorias del modelo híbrido y las del modelo conmutado original.

En cuanto a los costos computacionales, la Tabla 1 reporta los resultados obtenidos con las distintas fuentes.

Modelo	Núm. Ev.	Tiempo (ms)
Buck Hybrid	1143	595
Buck Switched	23497	10339
Boost Hybrid	10826	7488
Boost Switched	201675	76159
Boost Bi Hybrid	41210	29042
Boost Bi Switched	201250	106415
Cuk Hybrid	6426	7165
Cuk Switched	46964	26547
BuckBoost Hybrid	2066	1442
BuckBoost Switched	26506	12163

Tabla 1. Comparación de costo computacional

Puede verse que, como era esperado, el número de eventos obtenido con los modelos conmutados coincide aproximadamente con la cantidad de conmutaciones de la llave (en realidad es mayor debido a las conmutaciones del diodo al entrar en conducción discontinua). Por otro lado, el número de eventos en el modelo híbrido es alrededor de un orden de magnitud menor, ya que buena parte del tiempo funciona en modo promediado.

Esta diferencia en el número de eventos se traduce efectivamente en una reducción del tiempo de CPU que toman las simulaciones. La reducción de tiempos igualmente no sigue la misma proporción que la del número de eventos ya que el modelo híbrido agrega cierta complejidad al modelo (por ejemplo, hay que calcular los valores medios de las variables de los almacenadores, la amplitud del ripple, etc.).

De todas maneras, en casos más típicos donde la mayor parte del tiempo el modelo se encuentra en régimen permanente, las ventajas de usar la estrategia híbrida son mucho más notorias.

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó una estrategia híbrida de modelado de fuentes conmutadas que combina el uso de modelos conmutados durante los transitorios con el de modelos promediados durante el régimen. En base a esta estrategia, se desarrolló también una librería de fuentes conmutadas en el lenguaje Modelica.

En la simulación de distintos ejemplos se mostró que esta estrategia permite reducir sustancialmente los tiempos de CPU requeridos, ya que se reduce notablemente el número de eventos de conmutación.

Una característica notable de esta estrategia es que, si bien utiliza durante gran parte del tiempo modelos promediados, los resultados obtenidos son válidos tanto para el modo continuo como discontinuo de operación de las fuentes conmutadas. Esto además se logra sin recurrir a ningún modelo complejo, sólo ajustando automáticamente un parámetro al pasar del modelo conmutado al promediado.

En cuanto al trabajo futuro, nos proponemos en primer lugar estudiar el desempeño de esta metodología en la simulación de sistemas que cuentan con muchos convertidores, tales como los sistemas de generación híbrida con fuentes renovables, donde las demandas computacionales de la simulación son muy grandes (Migoni *et al.*, 2016). Por otro lado, teniendo en cuenta las ventajas que tienen los métodos de Quantized State Systems para simular esta clase de sistemas (Migoni *et al.*, 2015), es de esperar que utilizar estos algoritmos en lugar de DASSL permita simular estos sistemas en tiempos significativamente más rápidos.

Los modelos simulados y la librería desarrollada se pueden descargar desde [http://www.fceia.unr.edu.ar/~kofman/files/DCDC\\_Converters.mo](http://www.fceia.unr.edu.ar/~kofman/files/DCDC_Converters.mo).

## REFERENCIAS

- Cellier, F.E. and E. Kofman (2006). *Continuous System Simulation*. Springer. New York.
- Chiniforoosh, S, J Jatskevich, A Yazdani, V Sood, V Dinavahi, JA Martinez and A Ramirez (2010). Definitions and applications of dynamic average models for analysis of power systems. *IEEE Transactions on Power Delivery* **25**(4), 2655–2669.
- Davoudi, Ali, Juri Jatskevich and TD Rybel (2006). Numerical state-space average-value modeling of pwm dc-dc converters operating in dcm and ccm. *IEEE Transactions on power electronics* **21**(4), 1003.
- Fritzson, Peter (2015). *Principles of Object-Oriented Modeling and Simulation with Modelica 3.3: a Cyber-Physical Approach*. Wiley-IEEE Press.
- Maksimović, DRAGAN, ALEKSANDAR M Stanković, V Joseph Thottuvelil and George C Verghese (2001). Modeling and simulation of power electronic converters. *Proceedings of the IEEE* **89**(6), 898–912.
- Migoni, G., F. Bergero, E. Kofman and J. Fernández (2015). Quantization-Based Simulation of Switched Mode Power Supplies.. *Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International* **91**(4), 320–336.
- Migoni, G., P. Rullo, F. Bergero and E. Kofman (2016). Efficient Simulation of Hybrid Renewable Energy Systems.. *International Journal of Hydrogen Energy*. in press.
- Mohan, Ned, William P Robbins, TM Undeland, Robert Nilssen and Olve Mo (1994). Simulation of power electronic and motion control systems-an overview. *Proceedings of the IEEE* **82**(8), 1287–1302.
- Urquía, Alfonso, Carla Martin and Sebastián Dormido (2005). Design of spice lib: A modelica library for modeling and analysis of electric circuits. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems* **11**(1), 43–60.