

# SIMULACIÓN POR EVENTOS DISCRETOS DE CIRCUITOS DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA

Flavia FELICIONI<sup>†</sup> y Ernesto KOFMAN<sup>† †</sup>

<sup>†</sup>*Departamento de Electrónica, FCEIA - UNR.  
Riobamba 245 bis - (2000) Rosario - Argentina  
Email: flaviafelicioni@trixio.com.ar - kofman@fceia.unr.edu.ar*  
<sup>††</sup>CONICET

**Resumen**— Este trabajo presenta resultados de aplicación de los métodos de integración numérica por cuantificación de estados en la simulación de circuitos de electrónica de potencia. A través del análisis de las simulaciones con diferentes métodos, se muestra como las ventajas que presentan los métodos de QSS y QSS2 en la integración numérica de sistemas discontinuos generales se traducen en una reducción considerable de los costos computacionales en la simulación de sistemas de electrónica conmutados.

**Palabras Clave**— Simulación, DEVS, Sistemas Híbridos, Electrónica de Potencia.

## I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de electrónica de potencia agregan varios desafíos al campo de la simulación numérica (Mohan *et al.*, 1994). En particular, dos grandes dificultades se suman a las complicaciones habituales que presenta la integración numérica de ecuaciones diferenciales ordinarias.

Por un lado, es muy común la presencia de elementos de conmutación que a nivel del modelo provocan cambios en la estructura de las ecuaciones. Como se sabe, estas discontinuidades en general constituyen un serio problema para la mayor parte de los algoritmos de integración.

Por otro lado, no es muy sencillo incorporar el comportamiento discontinuo a los sistemas de ecuaciones de estado que habitualmente utilizan los métodos de integración para su posterior integración.

La primer dificultad puede solucionarse parcialmente utilizando modelos aproximados que evitan las discontinuidades (Pejovic y Maksimovic, 1995). Sin embargo en este proceso se pierde precisión y confiabilidad y, además, los modelos resultantes presentan otro tipo de problemas que devienen en la utilización de un paso de integración muy pequeño (Elmqvist *et al.*, 1994).

La segunda dificultad es en general solucionada mediante la utilización de herramientas de modelado

avanzadas, como Spice (Nagel, 1975) y sus dialectos o Dymola (Elmqvist, 1978). Sin embargo, aunque particularmente esta última herramienta cuenta con rutinas bastante eficientes para el tratamiento de discontinuidades, estos programas no pueden escapar a los problemas intrínsecos de los algoritmos numéricos cuando se encuentran con conmutaciones.

Estos problemas intrínsecos tienen que ver con la necesidad de detectar exactamente los puntos en los que se producen las discontinuidades. La integración a través de discontinuidades sin técnicas de detección de eventos puede causar ineficiencia severa, e incluso fallas de simulación o generación de secuencias de eventos incorrectas, debido a que la presencia de funciones que no son suaves viola las suposiciones teóricas en las que se basan los algoritmos (Barton, 2000).

Si bien se han desarrollado una amplia variedad de técnicas de detección, estas deben necesariamente iterar para encontrar las discontinuidades y el costo computacional resultante se incrementa significativamente a medida que la frecuencia de dichas conmutaciones aumenta.

Desafortunadamente, en los sistemas de electrónica de potencia es muy común encontrar dispositivos que conmutan muy rápidamente. En consecuencia, aún los métodos y las herramientas más avanzadas de simulación están bastante lejos de brindar una solución realmente eficiente y precisa en estos casos.

Como un problema inicialmente alejado del tratamiento de discontinuidades, hace unos años se comenzaron a desarrollar nuevas técnicas de aproximación de ecuaciones diferenciales basadas en un principio completamente novedoso: la cuantificación de las variables de estado en lugar de la discretización del tiempo.

Los primeros trabajos basados en dicha idea (Zeigler y Lee, 1998) mostraron que la misma conducía a una representación por eventos discretos en términos del formalismo DEVS (Zeigler *et al.*, 2000). Luego, estas ideas fueron plasmadas en dos métodos generales de integración numérica de ecuaciones diferenciales ordinarias denominados QSS (Kofman y Junco, 2001) y QSS2 (Kofman, 2002a).

Estos nuevos métodos, además de presentar carac-

terísticas notables de estabilidad y de cota de error, tienen propiedades que los hacen particularmente aptos para el tratamiento eficiente de discontinuidades.

La primera propiedad importante es que las trayectorias de estado en los modelos de simulación resultantes (denominados QSS y QSS2) son seccionalmente lineales o parabólicas. En consecuencia la detección de discontinuidades se limita a encontrar las raíces de un polinomio de segundo grado a lo sumo.

Otra propiedad importante es que los métodos son asincrónicos en sí mismos y la presencia de estos eventos no altera el funcionamiento de las rutinas.

En consecuencia, los métodos de cuantificación aparecen como una alternativa muy interesante para la simulación de sistemas híbridos en general y de sistemas de electrónica de potencia en particular.

Este trabajo intenta dar los primeros pasos en esta dirección, estudiando la utilización de dichos métodos en dos ejemplos de sistemas de electrónica de potencia. Si bien no se desarrolla una metodología general, se muestran algunos indicios de cómo debe procederse para realizar una simulación de un sistema genérico y se discuten algunos detalles de la implementación.

Junto a la simulación de los ejemplos mencionados, se realiza un pequeño estudio comparativo con los métodos clásicos donde se contrastan los aspectos concernientes a los costos computacionales, precisión, robustez y simplicidad de los mismos.

## II. MÉTODOS DE CUANTIFICACIÓN

Los métodos de QSS y QSS2 se basan en la cuantificación de las variables de estado de una ecuación diferencial ordinaria en su representación como sistema de ecuaciones de estado.

Dado un sistema de la forma:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) \quad (1)$$

los métodos de QSS y QSS2 lo aproximan por el siguiente:

$$\dot{x}(t) = f(q(t), u(t)) \quad (2)$$

En este nuevo sistema *cuantificado*, las variables  $x(t)$  y  $q(t)$  se relacionan mediante funciones de cuantificación definidas según el orden del método.

En ambos casos, QSS y QSS2, el sistema aproximado resultante (2) es equivalente a un sistema de eventos discretos DEVS.

### A. Método de QSS

El método de QSS (por *Quantized State Systems*) realiza una aproximación de primer orden, por lo que puede verse en cierta medida como un método análogo al de Euler. Para esto, utiliza funciones de cuantificación con histéresis que vinculan  $x(t)$  y  $q(t)$  en (2).

El comportamiento entrada/salida de una función de cuantificación con histéresis es el mostrado en la Fig.1. En la misma, el parámetro indicado como  $\Delta q$  se denomina *quantum*.

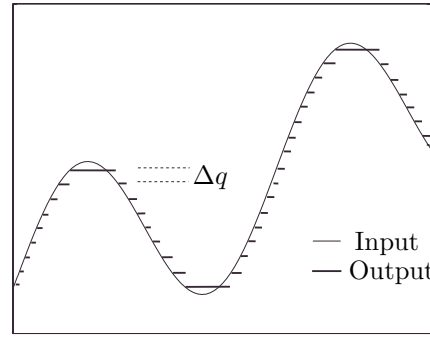


Figura 1: Entrada y Salida de un cuantificador de Orden Cero

Debido a la manera que están definidas las funciones de cuantificación con histéresis, las trayectorias de  $q(t)$  en la Ec.(2) resultan seccionalmente constantes. En consecuencia, asumiendo que  $u(t)$  es seccionalmente constante, resulta que  $\dot{x}(t)$  es seccionalmente constante y finalmente las trayectorias del estado  $x(t)$  son seccionalmente lineales.

La Fig.2 muestra el Diagrama de Bloques (DB) del QSS dado por (2).

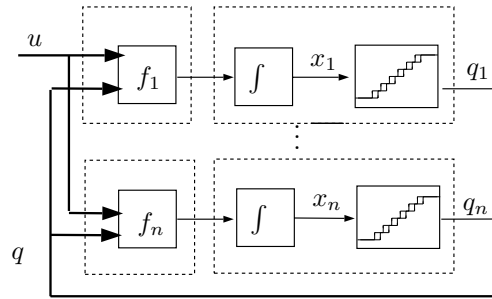


Figura 2: Diagrama de Bloques de un QSS

En este DB puede apreciarse también dos clases de subsistemas: funciones estáticas (correspondientes a las componentes  $f_i$  de  $f(q, u)$ ) e integradores cuantificados (integradores con un cuantificador con histéresis en la salida).

Debido a que todos estos subsistemas tienen entradas y salidas seccionalmente constantes, su comportamiento puede representarse exactamente mediante modelos DEVS muy simples (Kofman y Junco, 2001).

De esta forma, la simulación de un sistema mediante QSS se puede realizar construyendo el DB del mismo y utilizando los modelos DEVS de las funciones estáticas e integradores cuantificados (de los cuales hay que elegir el quantum).

### B. Método de QSS2

El método de QSS realiza sólo una aproximación de primer orden (al cuantificar se pierde la información de las derivadas superiores de  $x(t)$ ). Por esto, para mejorar la precisión sin afectar el número de cálculos, se desarrolló un método de segundo orden denominado

QSS2.

Este método es muy parecido al anterior sólo que ahora los cuantificadores conservan la primer derivada, brindando trayectorias seccionalmente lineales (Fig.3).

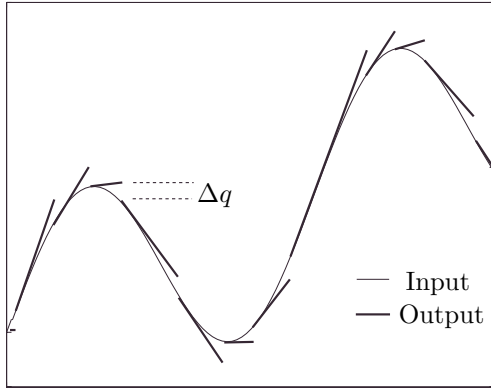


Figura 3: Trayectorias Entrada/Salida en un *cuantificador de primer orden*

El esquema de simulación es igual que antes (Fig.2), sólo que ahora las trayectorias son seccionalmente lineales y seccionalmente parabólicas, por lo que los modelos DEVS de los integradores cuantificados y las funciones estáticas son un poco más complejos (Kofman, 2002a).

### C. Otras características

Además del esquema novedoso de simulación por eventos discretos, QSS y QSS2 tienen propiedades muy fuertes de convergencia, estabilidad y cota de error (Kofman y Junco, 2001; Kofman, 2002a). Estos métodos muestran también algunas ventajas interesantes en la simulación de Ecuaciones Diferenciales Algebraicas (Kofman, 2002b).

Mas allá de esto, las ventajas más importantes son las que se encuentran en los Sistemas Híbridos. Como ya se discutió en la introducción, el uso de QSS y QSS2 facilita significativamente la detección de eventos, el tratamiento de las discontinuidades resultantes y la representación e interacción con la parte discreta.

En caso de haber partes continuas y discretas, las primeras pueden representarse mediante un modelo DEVS acoplado siguiendo el esquema de la Fig.2 mientras que las segundas pueden representarse mediante otro modelo DEVS. Luego, dichas partes pueden conectarse entre sí (sin realizar ningún tipo de modificación) y las propiedades de los métodos garantizan el correcto funcionamiento del sistema así acoplado.

Una descripción más detallada del funcionamiento de los métodos de QSS y QSS2 en Sistemas Híbridos puede encontrarse en (Kofman, 2003).

## III. APLICACIONES EN CIRCUITOS CONMUTADOS

El objetivo de esta sección es presentar los resultados de simulación con QSS2 de dos circuitos de electrónica

de potencia: el convertidor Forward (o Buck) y el Boost.

Dichos convertidores se utilizan frecuentemente en el campo de las fuentes de potencia reguladas de continua y en el control de velocidad de motores de corriente continua.

Uno de las principales dificultades en la simulación de tales circuitos es que existe una gran diferencia entre las constantes de tiempo asociadas con la parte continua del mismo y el período de conmutación de las llaves (muy rápido en relación al anterior).

Para el modelado se considerará una situación de lazo abierto, asumiendo que el elemento de conmutación es una llave ideal operando a una frecuencia fija.

### A. Convertidor Forward

El convertidor Forward (Mohan *et al.*, 1995) es una fuente conmutada que produce un voltaje promedio de salida siempre inferior al de entrada. En la figura n+1 se puede ver un esquema de este convertidor alimentando a una carga resistiva pura.

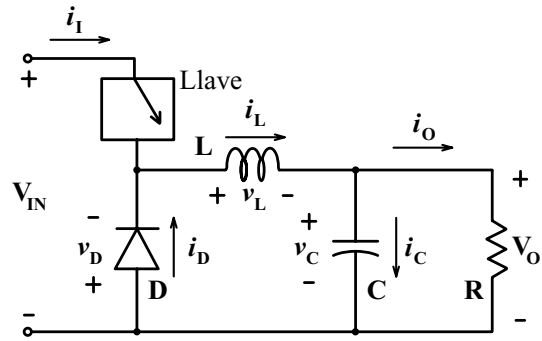


Figura 4: Circuito del convertidor Forward.

Durante cada período  $T = 1/f$  existe un tiempo de conducción  $t_C$  y otro complementario de no-conducción  $T - t_C$ . Se define como ciclo de trabajo  $\delta \triangleq t_C \cdot f$ . Por medio del ajuste del ciclo de trabajo  $\delta$  se puede controlar la tensión de salida  $V_0$ .

Este convertidor puede ser caracterizado como un sistema híbrido, constituido por un subsistema continuo (circuito RLC) y un subsistema discreto (llave y diodo). Dependiendo del estado de conducción o apertura del diodo y de la posición de la llave, encontramos cuatro posibles combinaciones (si bien sólo tres, ya que con la llave cerrada el diodo no conduce) que modifican las ecuaciones diferenciales que rigen la parte continua. Estas resultan:

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{1}{L}(v_C + v_D) \quad (3)$$

$$\frac{dv_C}{dt} = \frac{1}{C}(i_L - \frac{v_C}{R}) \quad (4)$$

donde

$$v_D = \begin{cases} -V_{in} & \text{llave cerrada} \\ 0 & \text{llave abierta y diodo conduce} \\ -v_C & \text{llave abierta y diodo cortado} \end{cases} \quad (5)$$

Como se mencionó antes, las conmutaciones de la llave se dan de manera periódica e independiente de lo que ocurre en el circuito (eventos temporales). Sin embargo, el cambio en el estado del diodo para pasar de conducción a corte depende de que la corriente se haga cero (evento de estados).

Esta última observación demuestra la necesidad de detectar los cruces por ceros de la corriente. Como ya se remarcó, esto puede resolverse muy fácilmente en los métodos de QSS y QSS2 debido a la forma seccionalmente lineal y parabólica de las trayectorias de estado.

El sistema entonces se implementó en el simulador PowerDEVS (Pagliero *et al.*, 2003) que ya cuenta con librerías de bloques integradores y funciones estáticas para QSS y QSS2.

El modelo DEVS acoplado se muestra en la Fig.5, donde se puede observar también el bloque discreto que calcula la variable  $v_D$  y un bloque que detecta los cruces por cero de  $i_L$ . Este último bloque simplemente resuelve una ecuación cuadrática que representa la evolución de la trayectoria de estado seccionalmente parabólica.

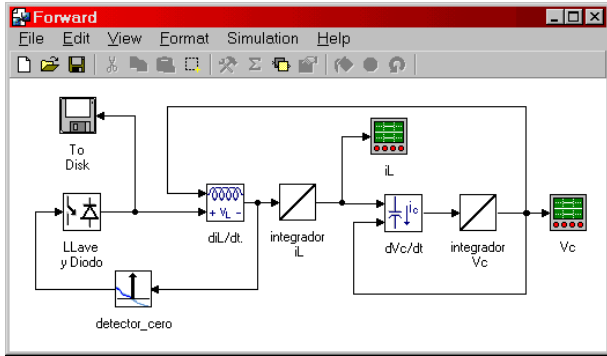


Figura 5: Modelo del Forward en PowerDEVS.

Para la simulación se utilizaron los siguientes parámetros:  $V_{in} = 200V$ ,  $f = 50KHz$ ,  $C = 20mF$ ,  $L = 0.1mH$  y  $R = 10W$ . Se consideró que se quiere conseguir como tensión de salida regulada en la carga  $V_O = 100V$ , para lo cual debe tomarse  $\delta = 0.5$ . Como quantum de los integradores QSS2 se usaron  $\Delta q_v = 0.5$  en la tensión y  $\Delta q_i = 0.2$  en la corriente.

Estos valores de quantum se eligieron del orden de la precisión buscada en cada variable. Es un hecho que en sistemas lineales y estacionarios el error global del método se encuentra acotado linealmente por la cuantificación (Kofman, 2002a). Si bien este no es el caso –es un sistema lineal a trozos– desde el punto de vista práctico se observa casi siempre (aún en casos no lineales) la validez aproximada de dicha cota.

Los resultados se muestran en la Fig.6.

Los primeros 50 períodos de la simulación se completaron con 117 pasos en el integrador que calcula la corriente y 269 en el que calcula la tensión. A estas 386 transiciones internas se le deben sumar las 100

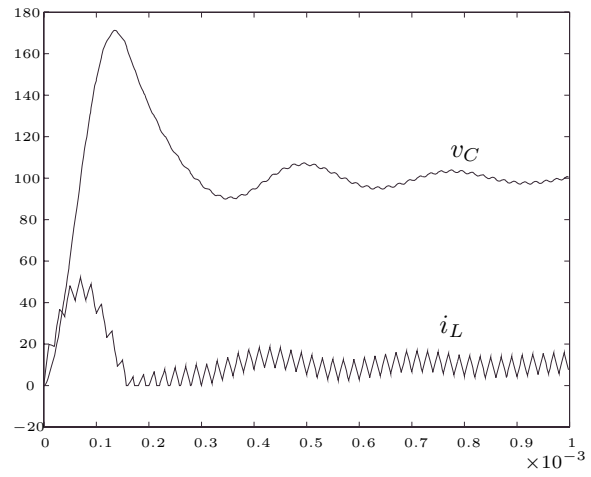


Figura 6: Tensión y Corriente en el Forward

conmutaciones de la llave y las 7 detecciones de cruce por cero, lo que da un total de 493 pasos.

La simulación se repitió usando una cuantificación mayor y menor, obteniéndose resultados cualitativamente similares con menos y más pasos respectivamente. Estos resultados son además coherentes con lo obtenido tanto con Simulink como con PSpice utilizando paso fijo muy chico. Si bien no hay forma teórica de garantizar que estos resultados son correctos (debido a la estructura variable), estos hechos constituyen una importante corroboración de lo mismo.

Para obtener resultados de similar precisión utilizando algoritmos de paso variable en Simulink se necesitan más de 2400 pasos (con el algoritmo ode23s usando una tolerancia relativa de  $1 \times 10^{-3}$ ). Además, la utilización de una tolerancia mayor en estos algoritmos provoca resultados cualitativamente distintos (debido a la omisión de eventos principalmente).

Este hecho demuestra no sólo la ventaja en cuanto a la reducción del número de pasos sino la ganancia de robustez por parte del método de QSS2.

En cuanto a costos computacionales, hay que tener también en cuenta que cada paso de QSS2 involucra muy pocas operaciones escalares elementales, mientras que algoritmos como ode23s (el que mejor performance demuestra en los casos analizados) son implícitos y de paso adaptativo, lo que conlleva operaciones matriciales complejas y costosas. En este sentido QSS2 no sólo reduce el número de pasos sino también el número de cálculos involucrados en cada paso.

## B. Convertidor Boost

El convertidor Boost (Mohan *et al.*, 1995), también llamado Elevador, es una fuente conmutada, que produce un voltaje promedio de salida regulado siempre superior al de entrada. El circuito está representado en la Fig.7.

Como puede apreciarse, este circuito es muy similar al del convertidor Forward diferenciándose sólo en la ubicación del diodo y la inductancia.

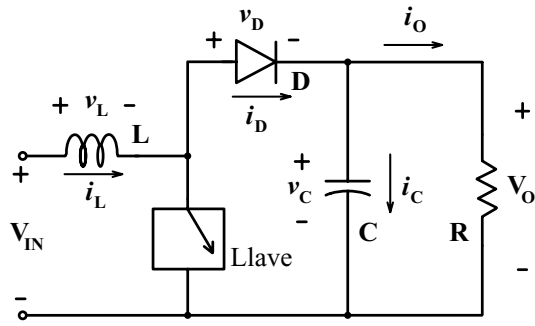


Figura 7: Circuito del convertidor Boost.

Con un análisis casi idéntico al anterior, las ecuaciones diferenciales resultan:

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{1}{L}(V_{in} - v_{sw}) \quad (6)$$

$$\frac{dv_C}{dt} = \frac{1}{C}(i_D - \frac{v_C}{R}) \quad (7)$$

donde

$$v_{sw} = \begin{cases} 0 & \text{llave cerrada} \\ v_0 & \text{llave abierta y diodo conduce} \\ -V_{in} & \text{llave abierta y diodo cortado} \end{cases} \quad (8)$$

y

$$i_D = \begin{cases} 0 & \text{llave cerrada} \\ i_L & \text{llave abierta y diodo conduce} \\ 0 & \text{llave abierta y diodo cortado} \end{cases} \quad (9)$$

Como antes, la llave es conmutada por eventos temporales (dependientes de la frecuencia y del ciclo de trabajo). El pase de conducción a corte del diodo en tanto puede darse por la conmutación de la llave (funcionamiento normal) o por anulación de la corriente (funcionamiento discontinuo). De esta forma, al igual que antes, hay que detectar los cruces por cero de la corriente  $i_L$  (en funcionamiento normal esto no ocurre nunca).

El modelo PowerDEVS se muestra en la Fig.8.

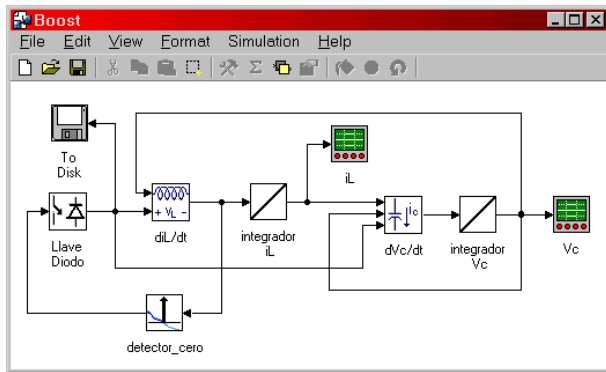


Figura 8: Modelo del Boost en PowerDEVS.

Para la simulación del modelo se utilizaron los parámetros  $V_{in} = 50V$ ,  $f = 50KHz$ ,  $C = 20mF$ ,

$L = 0.1mH$  y  $R = 10W$ . Se planteó como objetivo obtener una tensión de salida de  $75V$  para lo cual se utilizó un ciclo de trabajo  $\delta = 1/3$ .

Para la implementación del método de QSS2 se eligieron parámetros  $\Delta q_v = 0.5$  en la tensión y  $\Delta q_i = 0.5$  en la corriente.

Los resultados pueden apreciarse en las Figs.9 y 10.

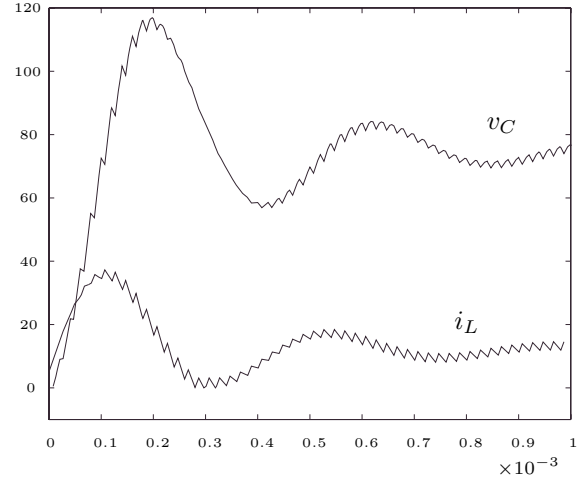


Figura 9: Tensión y Corriente en el Boost

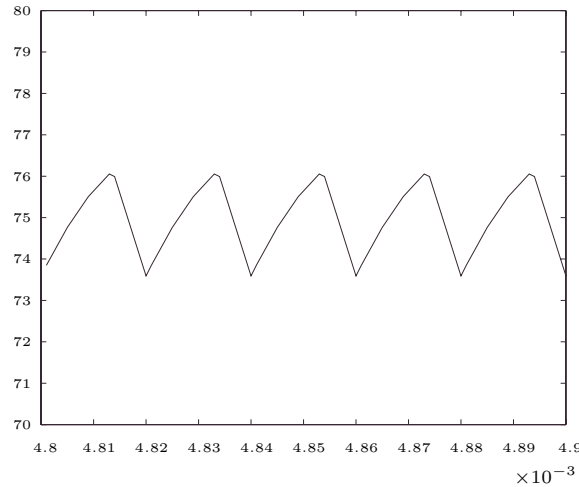


Figura 10: Tensión en Régimen Permanente en el Boost

El primer milisegundo de simulación se completó con 109 transiciones en el integrador que calcula la corriente y 176 en el de la tensión. Sumando a esto las 100 conmutaciones de la llave (no hubo detecciones de cero) la simulación se completó con un total 385 pasos.

Como en el caso anterior, el resultado fue muy robusto en lo cualitativo frente a los cambios de quantum y a la vez muy similar al obtenido con un paso fijo muy chico tanto en PSpice como en Simulink.

La obtención de resultados similares mediante métodos de paso variable requiere ahora más de 1400 pasos (ode23s de Simulink), lo que evidencia que QSS2

permite obtener nuevamente una clara reducción de los costos computacionales.

#### IV. CONCLUSIONES

Las observaciones realizadas con respecto a las facilidades que ofrecen los métodos de QSS y QSS2 para integrar sistemas discontinuos sumadas a los resultados obtenidos en los ejemplos tratados colocan a estos métodos como una solución más que prometedor para la simulación en circuitos de electrónica conmutada.

El breve análisis comparativo realizado entre estos nuevos enfoques y los métodos clásicos de integración evidencia ventajas de robustez, precisión, reducción de costos computacionales y sencillez de la implementación.

La única contrapartida puede consistir en la necesidad de elección del quantum, si bien este siempre se eligió del orden de la tolerancia del error por las razones ya esgrimidas.

Como ya se mencionó desde un principio, este trabajo es sólo una primera aproximación y por lo tanto hay una vasta variedad de problemas a resolver.

En primer lugar hay que hacer extensivos los resultados a otros circuitos (aquí sólo se analizaron circuitos convertidores). Cabe mencionar aquí que ya hay algunos resultados muy prometedores con circuitos inversores (Kofman, 2003; Pagliero *et al.*, 2003).

Es necesario también agregar hipótesis más realistas en cuanto a las características de los componentes. En este caso es esperable una mejora aún mayor en la performance con respecto a los métodos clásicos ya que la inclusión de retardos, tiempos de apagado, etc. es trivial en DEVS mientras que su descripción en tiempo discreto es más que difícil y trae aparejados nuevos problemas numéricos a los algoritmos de integración clásicos.

Teniendo en cuenta este último comentario, sería muy importante desarrollar librerías de modelos de componentes y circuitos en PowerDEVS. De esta forma, no sólo se facilitaría notablemente el estudio de los métodos sino que incluso esto convertiría a PowerDEVS en una herramienta a tener en cuenta para la simulación de sistemas complejos de electrónica de potencia capaz de competir con herramientas comerciales ya establecidas gracias a la originalidad de los métodos numéricos subyacentes.

#### REFERENCIAS

Barton, P., "Modeling, Simulation, and Sensitivity Analysis of Hybrid Systems: Mathematical Foundations, Numerical Solutions, and Software Implementations," *Proc. of the IEEE International Symposium on Computer Aided Control System Design*, Anchorage, Alaska 117–122 (2000).

Elmqvist, H. *A Structured Model Language for Large Continuous Systems*. Tesis Doctoral, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden (1978).

Elmqvist, H., F. Cellier, y M. Otter, "Object Oriented Modeling of Power Electronic Circuits Using Dymola," *Proceedings of CISS'94*, Zürich, Switzerland 156–161 (1994).

Kofman, E., "A Second Order Approximation for DEVS Simulation of Continuous Systems," *Simulation* **78**(2), 76–89 (2002a).

Kofman, E., "Quantization-Based Simulation of Differential Algebraic Equation Systems," Reporte Técnico LSD0204, LSD, UNR, To appear in *Simulation* (2002b).

Kofman, E., "Quantization-Based Simulation of Hybrid Systems," Reporte Técnico LSD0302, LSD, UNR, Submitted to RPIC'03. Available at [www.fceia.unr.edu.ar/~kofman](http://www.fceia.unr.edu.ar/~kofman) (2003).

Kofman, E. y S. Junco, "Quantized State Systems. A DEVS Approach for Continuous System Simulation," *Transactions of SCS* **18**(3), 123–132 (2001).

Mohan, N., W. Robbins, T. Undeland, R. Nilssen, y O. Mo, "Simulation of Power Electronic and Motion Control Systems – An Overview," *Proceedings of the IEEE* **82**(8), 1287–1302 (1994).

Mohan, N., T. Undeland, y W. Robbins, *Power Electronics Converters, Applications and Design*, John Wiley & Sons (1995).

Nagel, L., "SPICE2: A Computer Program to Simulate Semiconductor Circuits," Reporte Técnico ERL-M520, University of California, Berkeley (1975).

Pagliero, E., M. Lapadula, y E. Kofman, "PowerDEVS. Una herramienta integrada para la simulación por eventos discretos," Reporte Técnico LSD0304, LSD, UNR, Submitted to RPIC'03. Available at [www.fceia.unr.edu.ar/~kofman](http://www.fceia.unr.edu.ar/~kofman) (2003).

Pejovic, P. y D. Maksimovic, "A New Algorithm for Simulation of Power Electronic Systems Using Piecewise-Linear Device Models," *IEEE Trans. Power Electron.* **10**(3) (1995).

Zeigler, B., T. Kim, y H. Praehofer, *Theory of Modeling and Simulation. Second edition*, Academic Press, New York (2000).

Zeigler, B. y J. Lee, "Theory of quantized systems: formal basis for DEVS/HLA distributed simulation environment," *SPIE Proceedings* 49–58 (1998).