

METODOLOGÍA PARA LA INVESTIGACIÓN EN ELECTRÓNICA DE POTENCIA BASADA EN UNA NUEVA HERRAMIENTA DIDÁCTICA

METHODOLOGY FOR POWER ELECTRONICS RESEARCH BASED ON A NOVEL DIDACTIC TOOL

Oswaldo López Santos

Universidad de Ibagué, Ibagué (Colombia)

Resumen

En este artículo se presenta una metodología de integración de actividades de enseñanza e investigación en electrónica de potencia basada en la aplicación de una nueva herramienta didáctica especializada en convertidores de potencia para fuentes conmutadas. Para lograr esta integración se definió como primer elemento una estructura computacional desarrollada en LabVIEW con base en el modelo del convertidor *Cuk*, acompañada de video-tutoriales, problemas propuestos, modelos de convertidores para la simulación e interfaces humano-máquina (HMI) para la medición y análisis de señales. Para completar la integración se incorporó una estructura experimental que emplea el convertidor *fly-back* como fuente aislada para el disparo de IGBT, y adicionó un sistema simultáneo de adquisición y generación de señales de alta velocidad, módulos externos de sensado, acondicionados y con circuitos aislados de disparo para MOSFET e IGBT.

Palabras clave: convertidor fly-back, convertidor *Cuk*, HMI, laboratorio virtual, convertidores DC-DC

Abstract

In this paper a methodology for integrating teaching and research activities in power electronics based on the application of a new tool specialized in power converters for switch-mode power-supplies (SMPS) is introduced. To achieve this integration is defined as the first element a computational framework developed in LabVIEW based on Cuk converter model, along with video tutorials, problems proposed, converter model for the simulation and human-machine interfaces (HMI) for measuring and signal analysis. To complete the integration incorporated experimental structure used by the fly-back converter as a source for shooting isolated IGBT, and added a simultaneous signal acquisition and generation of high-speed, external sensing modules with conditioning circuits and isolated gating circuits for MOSFET and IGBT.

Keywords: fly-back converter, Cuk converter, HMI interface, virtual laboratory, switch mode power supplies

Introducción

En una revisión reciente del estado del arte general en electrónica de potencia (Mellitt, 2008), se reunieron resultados publicados en los últimos años por la IET (Institution of Engineering and Technology) y se pronosticó que los desarrollos futuros en electrónica de potencia se enfocarán en dos áreas fundamentalmente:

- Modificaciones e innovaciones sobre soluciones tradicionales enfocadas al estudio de diversas técnicas, topologías y estrategias de control que permitan mejorar niveles de eficiencia y desempeño: Convertidores con conmutación en voltaje y corriente cero.
- Estudio de semiconductores de potencia y uso de nuevos materiales con características superiores a las del silicio, mayores velocidades y menor sensibilidad.

De otro lado, los resultados de investigación obtenidos alrededor del mundo publicados por el IEEE (Institution of Electrical and Electronics Engineering) relacionados con electrónica de potencia y aplicaciones industriales son cada vez más notorios y suman a las dos tendencias anteriores, el interés por:

- La tolerancia a fallos y la búsqueda de mayor confiabilidad y robustez en la operación de los convertidores de potencia.
- El acondicionamiento energético, que involucra compensación reactiva y eliminación de corrientes armónicas, generación distribuida a partir de energías y fuentes ininterrumpidas de potencia de pocas partes.

Complementariamente, en Matavelli, *et al.* (2006), se pronosticó que la investigación en electrónica de potencia apuntará en el futuro hacia las siguientes líneas:

- Circuitos integrados que involucren incluso elementos pasivos tales como capacitores e inductores, bajo el concepto de lo que se ha denominado “smart-power”.
- Reducción de interferencia electromagnética producida por los convertidores de potencia y disminución de la auto-susceptibilidad.
- Integración de la electrónica de potencia y el control digital.

De esta manera, es posible asegurar que el interés universal en electrónica de potencia es cada vez más alto y la presencia de convertidores electrónicos en todas las aplicaciones representa un desafío para la formación de profesionales que puedan brindar su aporte desde la ingeniería electrónica. Así, es necesario que se aborde la electrónica de potencia con la importancia que merece y se apoye su desarrollo desde el procesamiento de señales, los materiales electrónicos, la teoría del control y la electrónica digital, entre otras áreas del conocimiento.

Actualmente, la formación en electrónica de potencia se fundamenta en actividades de análisis, diseño, simulación e implementación. Sin embargo, la implementación arroja generalmente resultados y evidencias que no son realimentadas al proceso formativo, puesto que las problemáticas y las soluciones a las problemáticas no son documentadas con el mismo rigor con el que se documentan las evaluaciones de desempeño, eficiencia, regulación u otros. Entre muchas publicaciones, muy pocas han dado importancia a tratar aspectos experimentales fundamentales, como las expuestas por López, *et al.* (2004), en donde se presentan recomendaciones claves para el diseño de circuitos impresos en electrónica de potencia que probablemente brindan solución a problemáticas que sin la suficiente información tardarían tiempo en resolverse.

La ausencia de un “registro de tropiezos” o mejor, de un “registro de salidas exitosas a los tropiezos” en la experimentación con diversos convertidores de potencia que son tratados en proyectos al interior de las universidades y la industria nacional, es una problemática que tiene solución a través del vínculo didáctico entre la enseñanza y la investigación. Tal vínculo sólo será posible en la actualidad con el aprovechamiento adecuado de las herramientas tecnológicas de las que se dispone y a través del uso de metodologías concretas y específicas que articulen los diferentes proyectos para consolidar el conocimiento en electrónica de potencia demandado por el mundo actual.

Con base en los aspectos anteriormente mencionados, surge la iniciativa de proponer una estructura metodológica unificada soportada en lo que se ha denominado herramienta didáctica, para fortalecer el estudio de la electrónica de potencia y conservar

un esquema sólido de avance tanto analítico como experimental. Este artículo reúne diferentes elementos que han sido tratados desde la perspectiva disciplinar de la electrónica de potencia, de la educación en ingeniería y de la metodología de la investigación, proponiendo un esquema metodológico basado en la herramienta.

Marco conceptual de la investigación en electrónica de potencia

Se plantean los siguientes interrogantes: ¿Se han propuesto metodologías para articular a mediano o largo plazo investigaciones en electrónica de potencia? ¿Se reconoce la importancia de la participación de otras disciplinas, requerida para abordar la investigación en electrónica de potencia hoy y en el futuro? ¿Se presentan avances continuos con miras a favorecer el desarrollo de didácticas específicas o formación investigativa para electrónica de potencia? La necesidad de resolverlos, justifica la preocupación por implementar un proceso sistemático y de rigor metodológico para la investigación en electrónica de potencia.

Es común asociar la sistematización de la enseñanza, y la didáctica, con las aplicaciones virtuales, o con uso de las herramientas colaborativas, y en este campo hay un sinnúmero de importantes desarrollos como puede revisarse en (Andújar, *et al.*, 2010), (Márquez, *et al.*, 2008), (Ibarra, *et al.*, 2007), (Delgado, *et al.*, 2009), entre otros. Algunos, como (Casallas, *et al.*, 2005), hacen evidente la intención pedagógica y específicamente para la electrónica de potencia, se destaca el trabajo presentado en Zumel, *et al.* (2006), donde se integra la didáctica y el uso de herramientas computacionales. Todas estas herramientas pueden clasificarse en grandes grupos como son: Laboratorios virtuales, herramientas didácticas de enseñanza (orientadas al docente), herramientas didácticas de aprendizaje (orientadas al estudiante), plataformas de enseñanza, plataformas de apoyo didáctico u otras. Se propone una herramienta didáctica de relación docencia-investigación (orientada al conocimiento) que soporta una metodología definida específicamente para el desarrollo de proyectos en control de convertidores de potencia.

El marco conceptual de la investigación en electrónica de potencia, presentado en la figura 1, involucra tres

elementos fundamentales: La estructura teórica, la estructura computacional y la estructura experimental. Este marco debe conservar el equilibrio necesario entre el conocimiento obtenido a partir de la indagación y el estudio teórico, las evidencias propias del proceso de implementación y los resultados proporcionados por herramientas de simulación y apoyo computacional. La interacción permanente de estas estructuras permite la concentración de conclusiones, aportes y avances, reduciendo la reincidencia en problemáticas comunes de implementación.

Figura 1. Marco conceptual de la investigación en electrónica de potencia



Se denomina estructura teórica a los resultados de indagación de la literatura especializada y las publicaciones científicas. Esta, abarca la contribución de áreas del conocimiento complementarias a la electrónica de potencia, como son: procesamiento digital de señales, control digital, electrónica analógica y digital, entre otras. La estructura computacional está conformada por aplicaciones de computador dotadas con herramientas para asistir de forma flexible el trabajo con convertidores de potencia. Esta estructura, puede incluir herramientas de simulación como MATLAB®, PSIM® o Proteus®, así como herramientas propias desarrolladas para aplicaciones más específicas. La estructura experimental está conformada por un conjunto de circuitos electrónicos de uso común en la implementación de convertidores de potencia, tales como sensores, circuitos de disparo de semiconductores de potencia, prototipos completos de convertidores y otros que permitan recoger y disponer aprendizajes experimentales anteriores para nuevos desarrollos.

La figura 2 presenta el ciclo de integración docencia-investigación propuesto. La herramienta didáctica es considerada como el núcleo y eje esencial de la

metodología. Se pueden distinguir seis fases en el ciclo que son realizadas aprovechando el soporte brindado por la herramienta didáctica y un flujo externo, entre ellas las que conducen finalmente al

desarrollo de un producto de investigación a partir del cual se integran nuevos resultados. Cada una de estas fases toma sentido formativo y/o investigativo de acuerdo con el contexto de cada proyecto planteado.

Figura 2. Ciclo de integración docencia-investigación basado en el uso de la herramienta didáctica



Se han incluido tres etapas de formación que permiten obtener el nivel suficiente para enfrentar nuevos proyectos. Estas tres etapas se complementan una a otra y corresponden a las abordadas comúnmente en la formación en ingeniería: teoría, simulación y práctica. Durante la formación teórica se examinan conceptos y métodos de análisis conocidos, para lo cual la herramienta dispone de información en multimedia construida y depurada para ser complemento de las actividades de enseñanza-aprendizaje tradicionales. La formación asistida por simulación, permite analizar el comportamiento de las variables de los convertidores, posibilitando la interacción del usuario con los modelos a través de la modificación de parámetros en línea. En la formación asistida con implementación, la herramienta flexibiliza las pruebas y la verificación de funcionamiento de los convertidores, para lo cual dispone de una estructura experimental.

Posterior a la etapa formativa, es posible abordar un nuevo problema de diseño-implementación, para el cual se han incluido tres etapas: diseño, prototipado e implementación. El diseño asistido con simulación permite realizar pruebas a los modelos existentes o a

nuevos modelos con el fin de determinar la topología más adecuada y observar limitaciones de implementación. El prototipado modular asistido aprovecha la capacidad de las herramientas computacionales para la medición, la generación de señales y el análisis de datos y así mismo la estructura computacional. Finalmente, la etapa de desarrollo del producto final, exige la integración de los nuevos resultados a la herramienta, lo que implica una etapa adicional de análisis y acondicionamiento de información para aplicación en las etapas formativas.

Descripción de la herramienta

La estructura computacional: PVECLAB

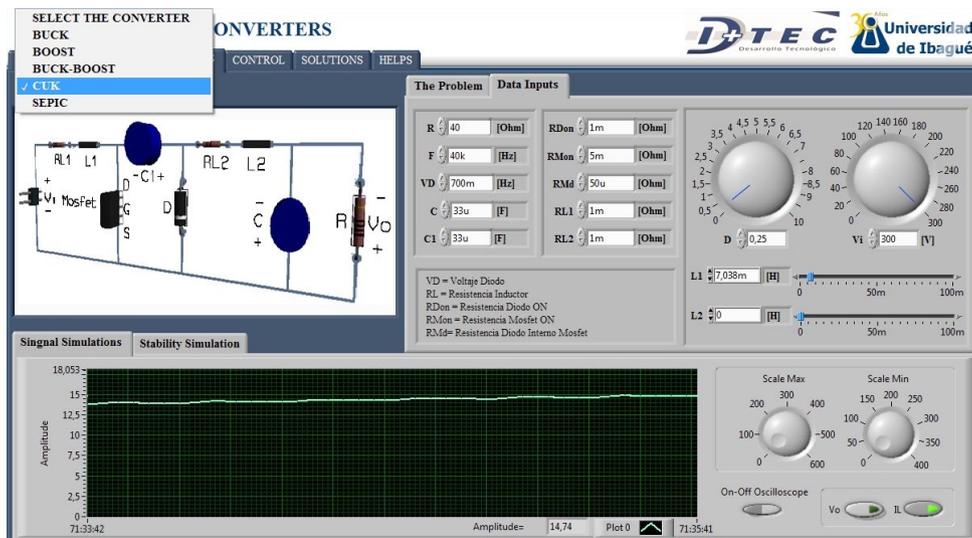
La estructura computacional de la plataforma, es una aplicación desarrollada en LabVIEW con el propósito de brindar soporte a las actividades de investigación y docencia en electrónica de potencia. Dispone de ayudas interactivas, problemas resueltos y herramientas que superan por su disposición especializada las posibilidades que brindan bajo el mismo concepto software como

MATLAB®, PSIM®, Proteus®. La herramienta didáctica de investigación en electrónica de potencia PVECLAB, como ha sido denominada por el equipo de investigación, posibilita la interacción con convertidores de potencia específicos en las diferentes etapas de la secuencia metodológica. La aplicación integra video - tutoriales que desarrollan y presentan conceptos estructurales de la temática presentando de forma didáctica los modelos matemáticos y los métodos de obtención.

La simulación es una herramienta fundamental en la verificación de diseños y permite observar el comportamiento de las variables de los convertidores, generalmente con condiciones iniciales y para tiempos predefinidos. Por ejemplo, en (Shaffer, 2007) se presentan ejemplos con análisis matemáticos y

descriptivos complementados con códigos para simular en MATLAB®, lo que sin duda complementa las actividades convencionales de un curso de electrónica de potencia. Sin embargo, con la propuesta de PVECLAB el usuario puede trabajar con un convertidor de potencia interactuando con los parámetros en tiempo real y observando la relación entre variables al aplicar alteraciones en la carga, la tensión de entrada o de ciclo útil de trabajo. Además, si la respuesta obtenida no es la esperada es posible modificar en línea los parámetros de diseño con la finalidad de encontrar valores que permitan cumplir con los requerimientos de diseño. En la Figura 3 se presenta la HMI de PVECLAB operando sobre un convertidor *Cuk*, en donde pueden observarse los diferentes parámetros del convertidor y las gráficas de simulación.

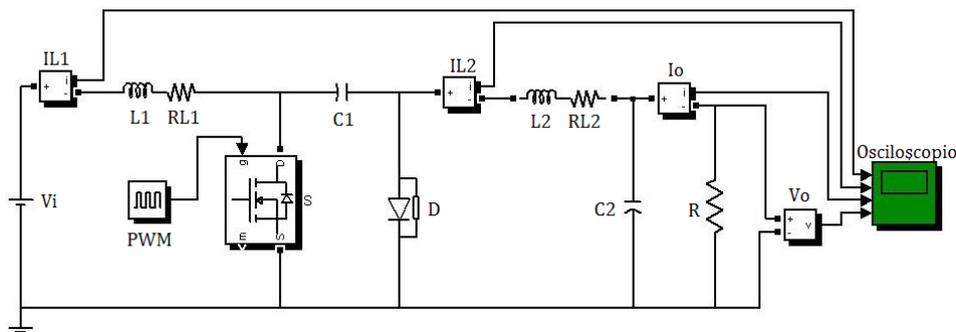
Figura 3. Interface gráfica para el análisis de convertidores DC/DC



Ejemplo: Modelo del convertidor Cuk: El convertidor Cuk mostrado en la Figura 4, permite obtener una tensión de DC negativa a partir de una fuente positiva y modificar su nivel, elevándolo o reduciéndolo según

sea la aplicación. Garantiza corriente de entrada continua (ventaja del convertidor Boost) y corriente suave en el capacitor de salida (ventaja del convertidor Buck).

Figura 4. Convertidor Cuk con MOSFET y pérdidas en inductores



Como se propone en Erickson, *et al.* (2006) para analizar el comportamiento de los convertidores DC/DC, es necesario por un lado obtener la relación de estado estable de las variables y por otro su dinámica. El modelo implementado en la estructura computacional permite estudiar el convertidor tanto en su comportamiento dinámico como en estado estable. Además, permite definir las resistencias de los devanados de las inductancias, las ESR de

los capacitores y las resistencias de encendido el interruptor y el diodo lo que acerca los modelos a la realidad.

Para el convertidor *Cuk* en modo de conducción continua, se pueden encontrar las representaciones en espacio de estados de la expresión (1) para el tiempo de encendido del interruptor S y de la expresión (2) para el tiempo de apagado del interruptor S.

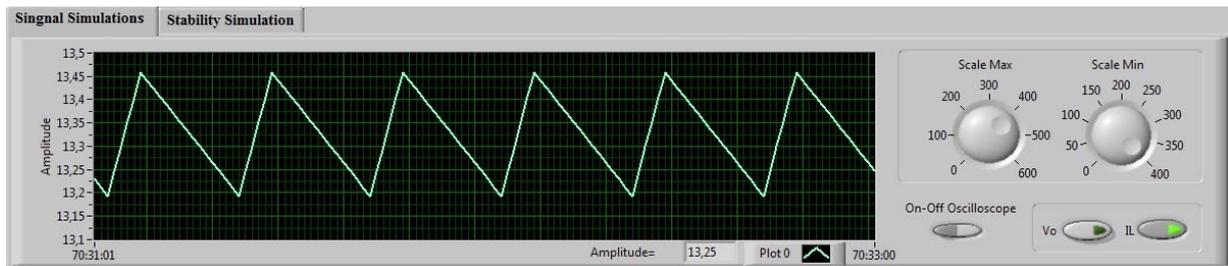
$$\begin{bmatrix} \frac{di_{L1}}{dt} \\ \frac{di_{L2}}{dt} \\ \frac{dv_{C1}}{dt} \\ \frac{dv_{C2}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{L1}}{L_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{(R_{L2}+ESR)}{L_2} & -1 & -\frac{1}{L_2} \\ 0 & \frac{1}{C_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_2} & 0 & -\frac{1}{RC_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ v_{C1} \\ v_{C2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} v_i \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{L1}}{dt} \\ \frac{di_{L2}}{dt} \\ \frac{dv_{C1}}{dt} \\ \frac{dv_{C2}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{(R_{L1}+R_D+ESR)}{L_1} & 0 & -\frac{1}{L_1} & 0 \\ 0 & -\frac{R_2}{L_2} & -1 & -\frac{1}{L_2} \\ \frac{1}{C_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_2} & 0 & -\frac{1}{RC_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ v_{C1} \\ v_{C2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} v_i \quad (2)$$

Con las ecuaciones evaluadas con 50 muestras en cada periodo de conmutación e interpolación lineal, es posible graficar el comportamiento instantáneo de las variables del convertidor con suficiente detalle,

tal y como se muestra en la Figura 5, en donde es posible obtener con facilidad el rizado de corriente sobre el inductor de entrada.

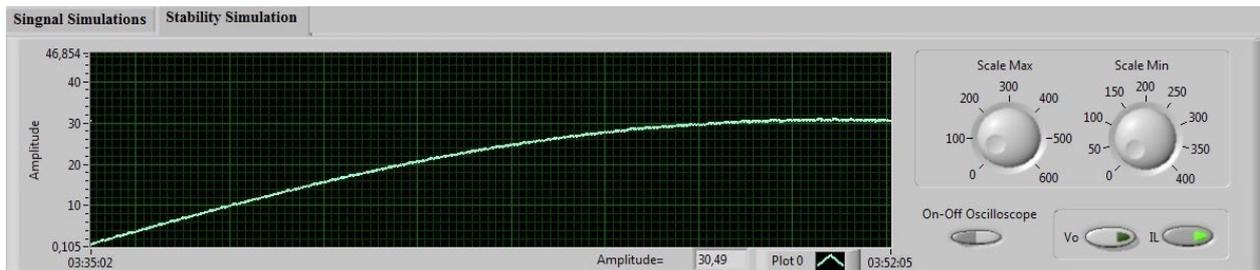
Figura 5. Simulación de rizado en corriente.



Ajustando la visualización en intervalos de tiempo prolongados, es posible analizar el comportamiento dinámico de los convertidores sin alterar los modelos

con aproximaciones y así mismo diseñar sistemas para su control. La figura 6, muestra la captura de la respuesta transitoria en la corriente del inductor de entrada.

Figura 6. Simulación de respuesta transitoria



La estructura experimental

Está compuesta por módulos de uso común en convertidores de potencia, como son: bancos de capacitores con polaridad y sin polaridad, sensores de tensión DC y AC, sensores de corriente DC y AC, y circuitos aislados de disparo de MOSFET e IGBT. Por ejemplo, en un convertidor complejo como el usado en un filtro activo trifásico de conexión paralelo presentado en (Pinto, *et al.*, 2007), se requiere de 8 circuitos de disparo, un sensor de tensión DC, tres sensores de corriente AC de baja frecuencia y un sensor de tensión en AC. Si estos circuitos están dispuestos en forma previa a la implementación el funcionamiento puede lograrse en menor tiempo y con mayor seguridad.

La estructura experimental y la estructura computacional se encuentran interconectadas a través de una tarjeta de adquisición NI-USB6210 de National Instruments, con canales de entrada análoga (250kS/s), y salidas digitales que han permitido implementaciones de PWM con una frecuencia portadora fija de 50kHz. De esta manera a través de una de las secciones de PVECLAB, es posible implementar controladores digitales para los convertidores, optimizando el proceso de experimentación.

Ejemplo: Fuente fly-back con aislamiento: La estructura experimental requiere de circuitos de disparo aislado que permitan la interconexión de semiconductores de potencia en configuraciones de puente en donde existe más de una referencia eléctrica diferente. Para garantizar la operación segura se introduce aislamiento entre la etapa de potencia y la etapa de control usando transformadores u acopladores ópticos. En el segundo caso se requiere de una fuente adicional con aislamiento para alimentar el circuito de disparo.

Es común utilizar en estas aplicaciones las fuentes fly-back y se encuentran definidos criterios de diseño e implementación como los presentados en (Coruh, *et al.*, 2010).

En la fotografía presentada en la Figura 7, se puede observar la aplicación PVECLAB operando en un computador portátil, la conexión realizada con la fuente fly-back a través de la tarjeta de adquisición de datos NI-USB6210 para la medición y los diferentes instrumentos de prueba. La fuente tiene tensión de entrada de 24Vdc, tensión de salida regulada de $\pm 15V$ y opera con 0.5A de carga resistiva.

Figura 7. Fotografía de la herramienta didáctica junto con equipos de prueba



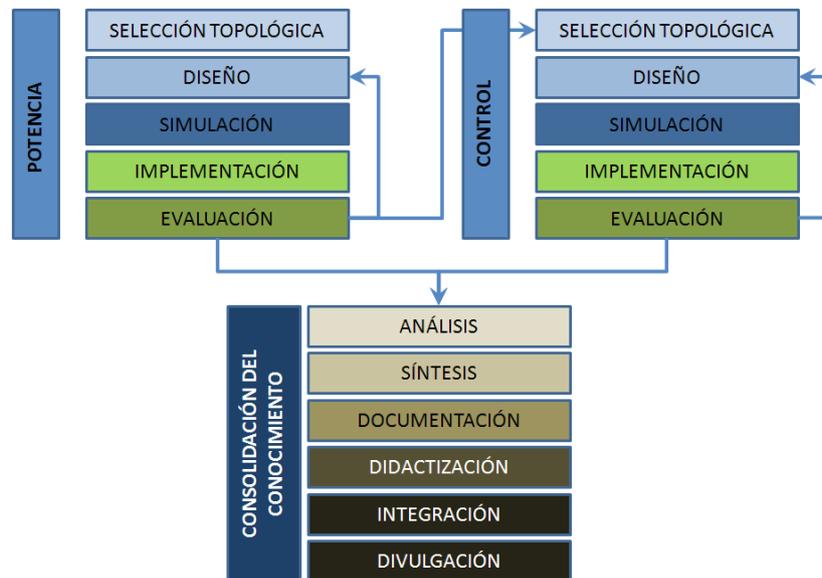
Metodología aplicada con base en la herramienta didáctica

La secuencia metodológica aplicada en la investigación con convertidores de potencia basada en la disposición de la herramienta didáctica como centro del ciclo de integración docencia-investigación se

basa en el diagrama presentado en la Figura 8, en donde pueden distinguirse tres etapas fundamentales: POTENCIA, CONTROL y CONSOLIDACIÓN DEL CONOCIMIENTO. Las dos primeras obedecen a la metodología común seguida en proyectos de ingeniería en donde los aspectos relevantes

obedecen al funcionamiento del producto. La última se refiere al tratamiento de los resultados como conocimiento para ser divulgados y especialmente para ser enseñados, especialmente a través de la herramienta didáctica.

Figura 8. Secuencia metodológica para el diseño e implementación de convertidores



Como resultados de la etapa referida al circuito de potencia, se debe obtener: documentación clara del diseño, procedimientos y análisis matemáticos; simulaciones del comportamiento en estado estable y la dinámica de las variables; y, un prototipo de potencia. Si se obtiene una desviación, esta origina revisiones en todo el proceso de diseño e implementación. Sobre el prototipo, es posible realizar mediciones de eficiencia y caídas de tensión, aplicar perturbaciones estáticas a la tensión de entrada o a la carga a lo largo del rango de operación esperada, y así determinar su impacto y el rango de variación requerido en el ciclo útil para el control, proceso al que se le ha denominado evaluación. Con base en los resultados y los modelos matemáticos del convertidor, se puede adelantar la etapa referida al control, que culmina con la obtención de un producto terminado.

Se requiere que la información reunida de las etapas referidas a la potencia y al control, sea útil para el planteamiento de nuevos desarrollos, para divulgarla a nivel científico y para tratarla en el proceso de

enseñanza; a esta etapa se le ha denominado consolidación del conocimiento. En esta etapa, luego de reunir la información de diseño y pruebas de la fuente en sus etapas de potencia y control, se analiza la información buscando indicios de elementos claves que deban ser recopilados de manera formativa, lo que corresponde al proceso de análisis. Este análisis origina información condensada y específica sobre la que puede realizarse síntesis de modelos, criterios, procedimientos y métodos. Cuando la información ha sido depurada, se adelanta la documentación formal que bien puede aprovecharse en publicaciones científicas o en docencia.

Para lograr que la información resultado de la investigación se transforme en conocimiento, se introduce el concepto de didáctica general discutido en (Camilloni, 2007) y (Cardeli, 2004). Es necesario moldear los resultados de forma que el conocimiento sea transferible a los estudiantes, lo que requiere tanto del dominio disciplinar como de la capacidad didáctica de quien lo enseña o quien lo

prepara para enseñarlo. Este importante proceso sería garantizado a través de la metodología propuesta y se le ha denominado didactización, que al aplicarse permanentemente permite el desarrollo de nuevas habilidades en docentes e investigadores. Luego, es necesario adaptar el conocimiento a las características computacionales de la herramienta. Para ello se han introducido los modelos matemáticos, gráficos, videos, problemas propuestos y soluciones, proceso al que se ha denominado integración. Todos los proyectos desarrollados en el área de electrónica de potencia y los proyectos de investigación aplican esta secuencia metodológica brindando actualización continua y en consecuencia conservación.

Resultados de la aplicación de la herramienta

La estructura computacional de la herramienta es aplicada actualmente en los cursos de electrónica industrial en la Universidad de Ibagué en la temática de convertidores DC-DC, para lo cual se dispone de video-tutoriales de conceptos generales, modos de operación (modo continuo y modo discontinuo), obtención de modelos y análisis de las topologías básicas (Buck, Boost, Buck-Boost, Cuk, SEPIC). Esta experiencia ha permitido complementar el tratamiento teórico a través del cual los estudiantes interiorizan el funcionamiento de los convertidores y las relaciones entre variables y parámetros. Alrededor de esta experiencia se adelanta una investigación que explora el efecto de PVECLAB en el aprendizaje, la motivación y la evaluación final. Actualmente se trabaja en la didactización de resultados obtenidos a partir del desarrollo de un rectificador Boost con corrección de factor de potencia y se introducen las

simulaciones y video-tutoriales de convertidores DC-AC con conmutación PWM en configuraciones de medio puente y puente completo.

Las señales obtenidas en la simulación usando PVECLAB han sido comparadas con las señales obtenidas a partir de simulaciones implementadas en Simulink® de MATLAB®, evaluando diferencias promedio inferiores al 2% en arreglos de 20000 muestras. De otro lado, la capacidad de la herramienta de hacer simulación en línea ha permitido extender los tiempos de trabajo sobre los modelos, capacidad que marca la diferencia con las herramientas de simulación convencionales.

Conclusiones

Una metodología clara de integración docencia-investigación en el área de la electrónica de potencia ha sido presentada. La secuencia metodológica requerida para el desarrollo de proyectos con convertidores de potencia ha sido ajustada con base en el uso de una nueva herramienta didáctica. La propuesta permite vincular las dificultades resueltas como material de estudio y fortalece el ejercicio docente en el área.

El cuestionamiento planteado en cada nuevo proyecto: ¿De qué manera los resultados de investigación pueden ser presentados en la herramienta?, permite depurar la forma de involucrar los modelos y brindarle al usuario de la herramienta mayores posibilidades de interacción. El ejercicio ha sido desarrollado en la herramienta PVECLAB, estructura computacional de la herramienta a través de video-tutoriales, interfaces gráficas y problemas propuestos.

Referencias

- Andújar J.M. y Mateo T.J. (2010). Diseño de laboratorios virtuales y/o remotos. Un caso práctico. Revista iberoamericana de automática e informática industrial (RIAI). Vol.7, No.1, pp. 64-72.
- Camilloni A. (2007). El saber didáctico. Colección: Cuestiones de educación. Editorial Paidós, Buenos Aires, pp. 231.
- Cardelli J. (2004). Reflexiones críticas sobre el concepto de transposición didáctica de Chevallard. Cuadernos de Antropología Social. Enero-Julio, pp. 49-61.
- Casallas R., Chacón R. y Posso F. (2005). Desarrollo básico de un laboratorio virtual de procesos basado en Internet. Acción Pedagógica. Enero-Junio, pp. 58-65.
- Coruh N., Urgun S. and Erfidan T. (2010). Design and implementation of fly-back converters. 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Application. Taichung, Taiwan, junio.
- Delgado M. y López J. (2009). Laboratorio virtual de control inteligente. Revista Educación en Ingeniería. Diciembre, pp. 102-110.

- Erickson R. and Maksimovic D. (2004). *Fundamentals of Power Electronics*. Kluwer Academic Publishers. New York, pp.132-375.
- Ibarra C., Medina S. y Bernal A. (2007). Implementación de un laboratorio virtual para el estudio de dispositivos electrónicos. *Revista Iberoamericana de Tecnología en Educación y Educación en Tecnología*. Julio, pp. 62-70.
- López J., Rojas F., Trujillo C. y Guacaneme J. (2004). Recomendaciones para el diseño de circuitos impresos de potencia. *Ciencia Investigación Academia Desarrollo*. No.2. pp. 44-47.
- Márquez D. y Cárdenas O. (2008). Implementación de un laboratorio virtual para la enseñanza de controladores PID. *Revista información tecnológica*. Vol.19. No.3. pp. 75-78.
- Mattavelli P. and Buso S. (2006). *Digital Control in Power Electronics*. Morgan & Clypool Publishers, USA, pp. 1-5.
- Mellitt, B. (2008). *Power Electronics: Yesterday and Today*. IET Power Electronics Journal. Marzo, pp. 1-3.
- Pinto J.G., Pregitzer R., Monteiro L. and Alfonso J. (2007). 3-Phase 4-Wire Shunt Active Power Filter with Renewable Energy Interface. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, Sevilla, España, marzo.
- Shaffer, R. (2007) *Fundamentals of Power Electronics with MATLAB*. DaVinci Engineering Series. Boston, pp. 373.
- Zumel P., Fernández C., Lázaro A., Barrado A., Olías E. y Pleite J. (2006). Herramienta interactiva para la enseñanza de la electrónica de potencia. Consultada el 10 de septiembre de 2010 en <http://www.upc.edu/euetib/xiicueet/comunicaciones/din/comunicacions/284.pdf>

Sobre el autor

Oswaldo López Santos

Ingeniero electrónico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá (2002). Magister en Ingeniería – Automatización industrial de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá (2010). Estudiante de Doctorado en Ingeniería - Automática de L'Institute National des Sciences Appliquées,

Toulouse. Docente de tiempo completo del programa de Ingeniería Electrónica e investigador activo del grupo D+TEC de la Universidad de Ibagué. Sus intereses actuales se centran en el desarrollo de convertidores de potencia de alta frecuencia aplicados a acondicionamiento eléctrico y módulos fotovoltaicos. e-mail: oswaldo.lopez@unibague.edu.co

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.