

# **CURSO SOBRE MODELADO Y CONTROL DE CONVERTIDORES DE ENERGÍA SOPORTADO EN CÁLCULO Y SIMULACIÓN POR ORDENADOR**

M. CASTRO<sup>1</sup>, R. SEBASTIÁN<sup>1</sup>, J. SÁNCHEZ<sup>2</sup> y J. QUESADA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Control. E.T.S. de Ingenieros Industriales de la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED). España  
mcastro@ieec.uned.es, rsebastian@ieec.uned.es*

<sup>2</sup>*Tutores de la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED). Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del País Vasco. España  
j.sanchez@ehu.es, j.quesada@computer.org*

*Se expone un programa y método didáctico para una propuesta de curso sobre modelado y control de convertidores de energía. Se fundamenta en la revisión de la literatura relevante, la elaboración teórica de conceptos fundamentales y el contraste e ilustración de esos conceptos mediante la utilización de modelos y simulaciones. En el curso se propone realizar un recorrido por las técnicas de modelado y control aplicables a este tipo de convertidores, subiendo desde el detalle y visión interna, hasta la perspectiva como subsistemas que han de interactuar con las redes eléctricas a las que se conectan.*

*Palabras clave: convertidor electrónico de energía, inversor, modelado y control, ingeniería de sistemas electrónicos, grafo de enlace, control digital.*

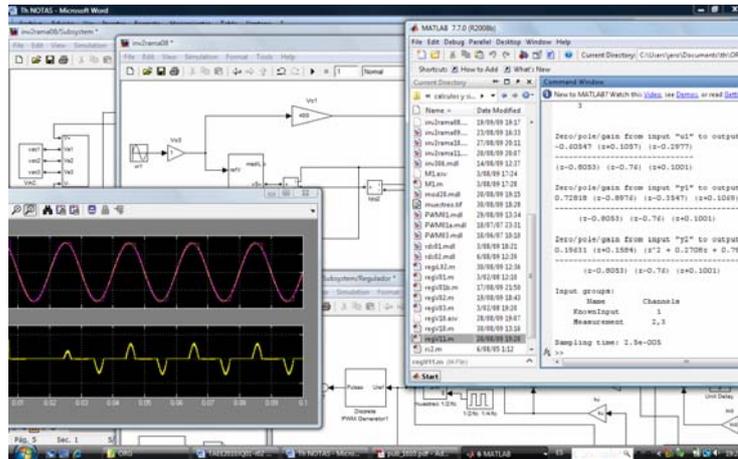
## **1. Introducción**

En esta presentación se plantea y propone una aproximación didáctica al modelado, regulación y simulación de convertidores electrónicos de energía. Se pretende que el programa y planteamiento didáctico pueda servir de referencia para la elaboración de un curso especializado o los contenidos de una asignatura de cursos avanzados de ingeniería electrónica. Se considera prerequisite una formación previa en electrotecnia y electrónica digital y de potencia, y una buena base en teoría de regulación automática, tanto de sistemas continuos como discretos.

Se trata de una propuesta que combina la exposición teórica con la práctica basada en cálculos y simulaciones. Se utiliza como herramienta de modelado, cálculo y simulación el entorno Matlab-Simulink en su versión R2008b, con especial utilización de los paquetes Control System Toolbox, SimPowerSystems y Symbolic Math Toolbox (Figura 1). Se plantea aplicar también el entorno 20sim de Controllab Products B.V, desarrollado por la universidad de Twente (Holanda), en su versión de evaluación. Se enfatiza y se presta especial atención a la aplicación de técnicas de regulación y control digital, que puedan ser implementadas sobre microcontroladores ( $\mu$ C) o procesadores digitales de señal (DSP) [1].

Se aborda en primer lugar el concepto de convertidor electrónico de energía y su regulación desde una perspectiva general, planteando el problema de intercambio de energía por medio de modelos simples en grafos de enlace [2], una de las técnicas más apropiadas para modelado de sistemas cubriendo diversos dominios físicos y resulta especialmente adecuada para modelar los intercambios de energía. Se utilizan ejemplos sencillos para destacar analogías, conceptos y técnicas generales. Se pasa luego a centrar el

estudio en los convertidores electrónicos de energía eléctrica con salida en corriente alterna, que tienen un ámbito de aplicación muy amplio en sistemas de alimentación ininterrumpida [3] y en generación distribuida a partir de energías renovables, aunque en ningún momento se abandona totalmente la visión general, planteando ejemplos y similitudes en otros campos de aplicación (regulación de motores, por ejemplo).



**Figura 1** Captura de pantalla del entorno Matlab-Simulink en una sesión de modelado y simulación

En la primera parte de la propuesta se profundiza a nivel de detalle en el modelado, regulación y simulación de un convertidor monofásico con salida en CA. Se tiene así un modelo sencillo y manejable de convertidor de energía, con lo que la transmisión de ideas y conceptos puede ser desarrollada en detalle sin que se distraiga demasiado el discurso general. Se exponen los conceptos de modulación, diseño de planta, control de variables promediadas en ciclo de trabajo, regulación en cascada, dinámica, respuesta a consigna y rechazo de perturbaciones. Cada concepto se ilustra y ejercita desarrollando modelos, simulaciones o cálculos. Se amplía luego la visión prestando atención al caso trifásico, que se desarrolla de forma muy rápida a partir del monofásico, y se detallan particularidades de este tipo de convertidores, como la modulación vectorial.

El punto de vista de detalle utilizado en esa primera parte se abandona luego para contemplar los convertidores como bloques regulados con el objetivo de que se comporten como fuentes de tensión o corriente ideales (modo creador de red y modo alimentador de red), describiendo campos de aplicación en los que se utilizan en esos modos de control. Se abordan aspectos relacionados con la generación de consigna y sincronización con la red eléctrica con la que interactúa el convertidor. Se pasa luego a plantear el problema, más complejo, de regulación en modo soporte de red, que es actualmente objeto de investigación. Los conceptos teóricos se fijan con prácticas de desarrollo de modelos y simulaciones, alternando la aplicación del modelo detallado de convertidor con modelos simplificados basados en fuentes de tensión o corriente ideales. Se introduce el papel que la transmisión de información entre convertidores puede tener en la adecuada sincronización y regulación distribuida, cuando varios de estos convertidores han de interactuar entre sí o con una red eléctrica.

En cada parte del curso se citan publicaciones que fundamentan la exposición, en su mayoría transacciones o artículos de conferencias de IEEE de los últimos años, de forma que la lista de referencias puede ser la base de ampliaciones de estudios o profundización en la materia.

Aunque este trabajo puede verse con una presentación especializada en la materia concreta que se aborda (control y regulación de inversores), se presenta también como ejemplo de una metodología más general, aplicable a la elaboración y transmisión de conocimiento especializado en electrónica, especialmente en aquellas materias en las que se ha de combinar la visión de sistema con la visión de detalle y en las que no resulta fácil la experimentación en laboratorio, que ha de ser sustituida por la simulación. Entre estas materias pueden citarse el control de motores en general o la conversión de energía en sistemas generadores o de almacenamiento. Se realiza a continuación un recorrido por los apartados más relevantes del curso exponiendo brevemente la aproximación a seguir en cada uno de ellos.

## 2. Convertidores electrónicos de energía

Se presenta el concepto de convertidor electrónico de energía como un sistema controlado que modifica la presentación de la energía eléctrica y regula sus parámetros fundamentales (tensión, corriente, frecuencia), de tal modo que, al actuar sobre un proceso físico, se consiga una evolución apropiada de alguna de las variables de dicho proceso. El sistema incluirá normalmente dispositivos electrónicos trabajando en conmutación que gradúen el aporte de energía a la planta controlada, que actúa como elemento de almacenamiento intermedio y de conversión de energía hacia el dominio físico de la carga (Figura 2). Siguiendo la técnica de modelado en grafos de enlace [2], la potencia de salida se transmite a la carga como la combinación de dos variables: esfuerzo  $e$  y flujo  $f$ . En general, una de esas variables será la controlada y la otra actuará como una perturbación debida a la carga.

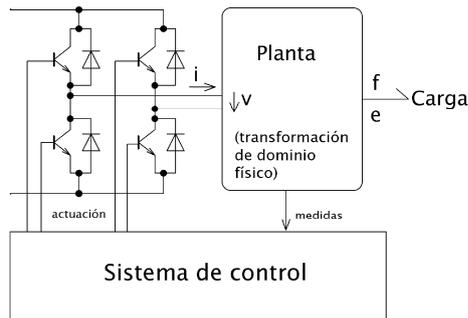


Figura 2 Modelo general de un convertidor electrónico de energía

A título de ejemplo se presenta (Fig. 3) el modelo para un inversor o convertidor a salida de tensión de CA, con salida en el dominio eléctrico (tensión y corriente) y un regulador de motor de cuya salida se realiza en el dominio mecánico (par y velocidad angular).

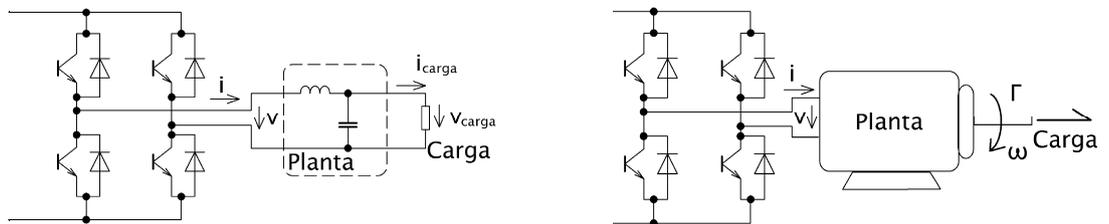


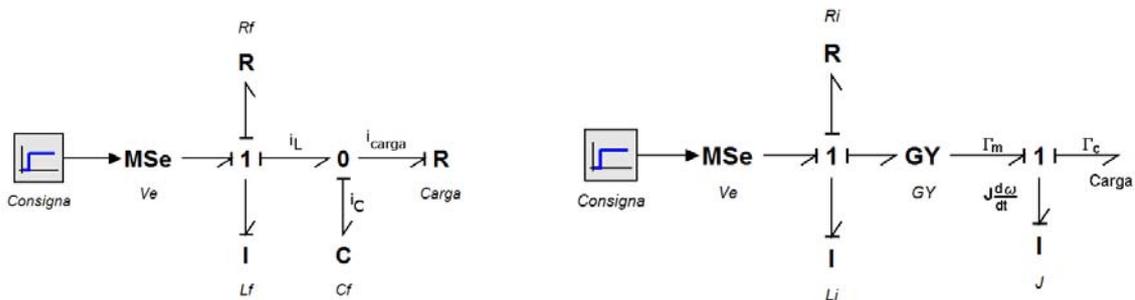
Figura 3 Modelos de un inversor y un regulador de motor

En estos sistemas el controlador se diseña para que una de las variables de salida (esfuerzo o flujo) siga la consigna prevista. La carga impone la evolución de la otra variable energética. Las variaciones de esta variable aparecen como perturbaciones frente a las que ha de reaccionar el regulador. Se da importancia a un parámetro que se define como *impedancia generalizada de salida* del convertidor controlado, y coincide con la función de transferencia que determina el efecto sobre la variable controlada de las variaciones de la variable no controlada provocadas por la carga (con cambio de signo). Así para el primer ejemplo, inversor, la impedancia de salida es la función de transferencia entre tensión de salida y corriente entregada a la carga, mientras que para el motor relaciona velocidad angular con par de carga:

$$\text{Inversor : } Z(s) = -\frac{v_{\text{salida}}(s)}{i_{\text{carga}}(s)} \quad \text{motor : } Z(s) = -\frac{\omega(s)}{\Gamma_{\text{carga}}(s)} \quad (1)$$

La planta y el regulador han de diseñarse para que, dentro de las restricciones impuestas por los requisitos energéticos, se tenga una dinámica que permita reducir al máximo esta impedancia. Dependiendo del tipo de convertidor y de la aplicación, es posible establecer parámetros numéricos que faciliten la comparación de prestaciones dinámicas de salida, así como métodos de ensayo normalizados para su medida. Se concretarán algo más en el próximo apartado para el caso de inversores.

Esta visión general se puede ilustrar con modelos y simulaciones realizados con 20sim y descritos por grafos de enlace (Fig. 4).

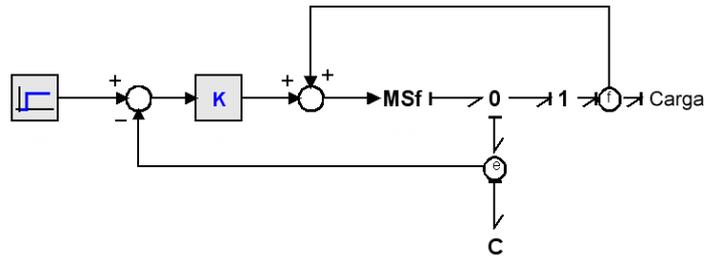


**Figura 4** Modelos en grafo de unión de un inversor y un motor de CC

La planta deberá tener característica paso-bajo, de cara a evitar que la señal de alta frecuencia generada en el proceso de modulación afecte a la carga. Existirá además un elemento que almacene energía, con característica inercial, y que establezca la variable de salida ante perturbaciones. Este elemento actúa como integrador de variables que confluyen en la unión de salida.

La técnica más habitual de regulación aplicada en este tipo de convertidores es la de regulador en cascada, que controla en el bucle interno la variable de entrada a la planta que ha de equilibrar la perturbación de salida (corriente en el caso de un inversor en modo tensión, par en el caso de un motor regulado en velocidad). En el bucle externo se regula ya la variable de salida utilizando como actuador el sistema interno regulado, que se ha de comportar como una fuente lo más cercana posible a ideal para la variable que compensa la perturbación. Este esquema de regulación puede admitir diversas variantes, pudiendo existir, por ejemplo, prealimentación de la perturbación o no. Estas variantes, para diversos modelos de planta, pueden ser simuladas con 20sim. En la Fig. 5 se representa, como ejemplo, un

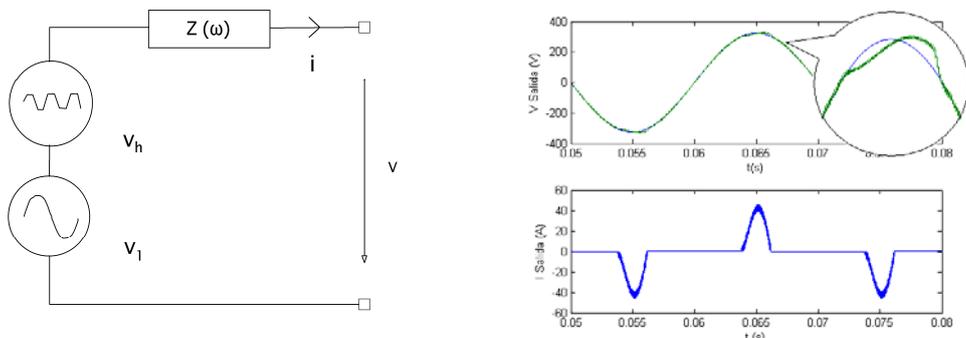
esquema simplificado de regulación en cascada, modelando el bucle interno como fuente de flujo controlada, que ejerce de actuador para el bucle externo. Se trata de un esquema con prealimentación de perturbación. De esta forma se puede alcanzar una visión general de las opciones de regulación para cualquier convertidor de energía.



**Figura 5** Esquema de regulación en cascada, con prealimentación de perturbación

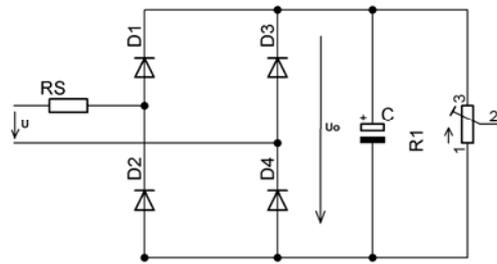
### 3. Modelado y regulación de inversores

Se presenta en primer lugar un modelo muy simple del inversor regulado, como una combinación serie de fuente de tensión correspondiente al primer armónico, fuente de tensión que modela armónicos superiores e impedancia en serie que depende de la frecuencia, analizando la influencia de la modulación, filtro (planta del sistema) y regulación, en esos parámetros. Se plantea entonces el objetivo de la regulación como el seguimiento de una consigna de tensión sinusoidal con rigidez ante perturbaciones debidas a cargas distorsionantes a la salida, comentando el método habitual de ensayo con carga no lineal (Figura 6). Como medida de distorsión de la tensión de salida se utilizan la distorsión armónica total (THD) o el factor de distorsión armónica (TDF). Para los valores de distorsión habituales (<10%) ambos parámetros son prácticamente equivalentes.



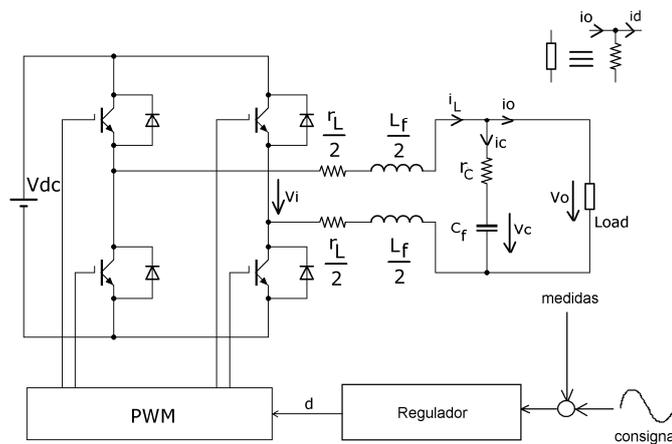
**Figura 6** Modelo esquemático de inversor regulado y distorsión de salida debida a carga no lineal

Las normas de caracterización y ensayo de sistemas de alimentación ininterrumpida (SAI), como la IEC 62040-3 [4], fijan las cargas no lineales a utilizar en ensayos de características dinámicas y de distorsión de salida. Esta carga normalizada formará parte de los modelos de simulación en los que evalúa el comportamiento de una arquitectura de control concreta (Figura 7).



**Figura 7** Carga no lineal para ensayos según norma IEC 62040-3

Se fija un modelo de inversor monofásico (Fig. 8) que se utiliza en primer lugar para plantear los dos procesos que determinan la síntesis de la onda de salida: el proceso de modulación y el proceso de control o regulación. La calidad de la onda de salida depende de ambos procesos, si bien se puede considerar que el proceso de modulación y filtrado determina el comportamiento de la fuente de tensión en el modelo simplificado de Figura 6, mientras que la regulación va a determinar, sobre todo, el comportamiento ante variaciones de carga, es decir, la impedancia en dicho modelo. En el caso de inversor trifásico se pide, además, que las tensiones de salida se presenten como un sistema trifásico equilibrado y, por tanto, el contenido de secuencia negativa y homopolar en este sistema de tensiones ha de ser eliminado o reducido al máximo incluso ante carga desequilibrada.



**Figura 8** Modelo básico de inversor monofásico

Se revisan las técnicas de modulación en anchura de pulso típicamente aplicadas y su influencia en la generación de armónicos [5]. Se llega a la conclusión de que, para estas técnicas de modulación la onda compuesta de tensión de salida incluye el armónico fundamental de banda base (onda que se pretende generar) y la portadora efectiva y sus armónicos. En inversores actuales de potencias media y baja, basados en IGBT, la portadora efectiva se sitúa hacia los 15-20 kHz, debido a limitaciones, hacia arriba, por pérdidas de conmutación, e interés, por otra parte, en elevar todo lo posible la frecuencia para reducir tamaño y peso de elementos reactivos y salir de la zona audible. La frecuencia base es la de la red eléctrica (50 Hz en Europa). Esta relación de frecuencias elevada facilita la eliminación de armónicos con un simple filtro LC paso-bajo de segundo orden.

En el modelado y control de inversores se ha de tener en cuenta la técnica de modulación, distinguiendo entre modulación natural y modulación regular. La primera de estas técnicas se realiza con circuitos analógicos y comparadores que directamente generan las señales de disparo de los dispositivos de conmutación, a partir de la comparación entre una portadora triangular y la señal moduladora. La segunda se basa en la generación por DSP o  $\mu C$  de las señales de disparo a partir de circuitos de cuenta y comparación y con muestreo periódico de la señal moduladora. Un modulador natural puede modelarse como una simple ganancia, mientras que uno regular incorpora un retardo que ha de ser tenido en cuenta [6]. En el caso de inversores trifásicos, para aumentar el aprovechamiento de tensión continua se pueden aplicar técnicas de inyección de tercer armónico en consigna de tensión o, alternativamente, utilizar modulación vectorial. Se trata, en cualquier caso, de provocar una modulación de tipo homopolar que desplace el neutro de salida respecto al punto medio del bus de tensión continua, de forma que se tenga la máxima excursión de modulación posible sin distorsión. Se ilustran estos procesos de modulación con simulaciones detalladas del caso monofásico y del trifásico.

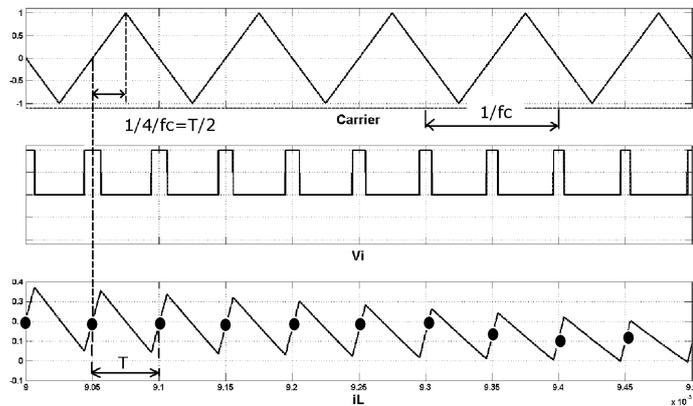
Se sigue con el planteamiento de los factores que determinan el diseño del filtro LC de salida del inversor, dando la misma importancia a su función como filtro y como planta a regular, que va a determinar la respuesta óptima ante perturbaciones. En su función como planta se ha de tener en cuenta que el ancho de banda del sistema regulado, en bucle cerrado, no podrá ser muy superior al de la planta si se quiere evitar saturación del actuador [7], por tanto el filtro ha de dimensionarse de forma que la frecuencia de corte esté por encima del armónico de corriente más alto contra el que se desee tener capacidad de actuación para evitar distorsión de tensión de salida. Se propone así un diseño de filtro basado, fundamentalmente, en la frecuencia de corte y el coeficiente de amortiguamiento deseados para una dinámica de planta rápida. Se ha propuesto en la literatura algoritmos de cálculo de filtro LC que no tienen en cuenta esta faceta relacionada con el control del inversor. En [8], por ejemplo, se calcula el filtro determinando C y L a partir de la especificación de distorsión armónica y minimizando luego la potencia reactiva del filtro. Estas técnicas y otras similares pueden dar lugar a filtros con impedancia característica relativamente elevada y respuesta lenta ante transitorios.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_L(t) \\ v_C(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_L + R \parallel r_C}{L_f} & -\frac{R \cdot Z_b}{(R + r_C) \cdot L_f} \\ \frac{R}{(R + r_C) \cdot Z_b \cdot C_f} & -\frac{k}{(1 + r_C/R) \cdot Z_b \cdot C_f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L(t) \\ v_C(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_b/L_f & \frac{R \parallel r_C}{L_f} \\ 0 & -\frac{R}{(R + r_C) \cdot Z_b \cdot C_f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d(t) \\ i_d(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$v_o(t) = \begin{bmatrix} \frac{R \parallel r_C}{Z_b} & \frac{R}{R + r_C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L(t) \\ v_C(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{R \parallel r_C}{Z_b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d(t) \\ i_d(t) \end{bmatrix}$$

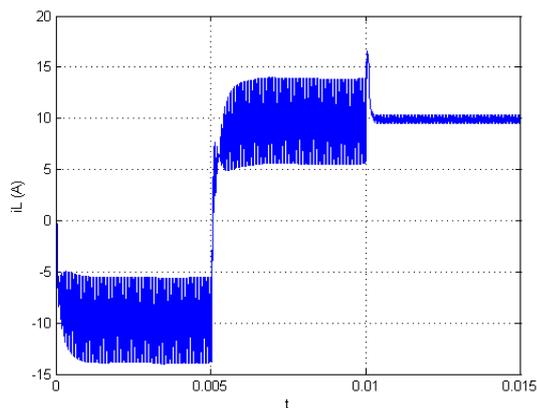
en p.u. con  $V_{base} = V_{dc}$ ,  $I_{base} = I_b$ ,  $Z_b = V_{dc}/I_b$  y  $k = Z_b/R$

Se pasa luego a plantear modelos para el inversor monofásico de una rama y de dos ramas, los modelos se desarrolla en espacio de estado, y se aplican las técnicas de promediado de modelos para obtener un modelo para variables medias en periodo de conmutación [9][10], se explica este concepto ilustrándolo con resultados de simulación. Los modelos, inicialmente continuos (Ec. 2), se transforman a modelos discretos orientados a regulación digital, comentando posibles simplificaciones. Se explica y justifica la técnica de muestreo a frecuencia igual a la de la portadora de modulación, que no se ajusta a la aplicación simple de la teoría de muestreo y se basa en muestreo sincronizado con portadora. Todos estos conceptos se fijan realizando ejercicios de simulación, llegándose a simular el proceso de muestreo y generación de PWM sincronizado (Figura 9).



**Figura 9** Muestreo de corriente sincronizado con portadora de PWM

El siguiente apartado importante del curso es el relacionado con las técnicas de regulación de corriente, se plantea el objetivo de regulación como la búsqueda de una respuesta de la corriente en bobina del filtro a consigna en escalón, con dinámica tal que permita que el sistema regulado pueda aproximar el comportamiento de una fuente ideal de corriente. Primero se estudia el problema de regulación analógica en un inversor con modulación natural, llegando a la conclusión de que un adecuado rechazo a perturbaciones sólo es posible para regulador de tipo PI. Este regulador puede diseñarse analíticamente a partir de la respuesta en bucle cerrado deseada, pero se ha de prestar atención al fenómeno de sobremodulación, que ha de evitarse, y que limita la máxima ganancia proporcional. También consideraciones relacionadas con la robustez de bucle, aconsejan limitar el ancho de banda. Se concluye que es posible, con regulación analógica y modulación PWM natural, obtener tiempos de subida en bucle cerrado del orden del periodo de conmutación y lograr establecimiento en poco más de dos periodos de conmutación. Se comprueba también que el análisis del regulador de corriente permite orientar las decisiones de diseño en cuanto a inductancia de filtro. Para regulación digital, con modulación regular, se analizan las técnicas predictivas [11][12], modelando y simulando reguladores y su respuesta a escalones de corriente (Fig.10)

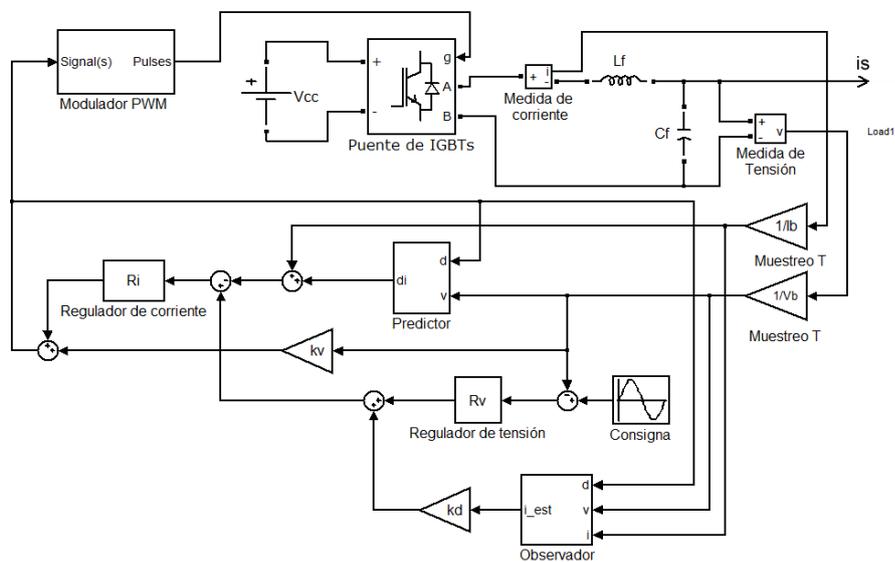


**Figura 10** Resultado de evolución de la corriente en bobina de un inversor regulado en corriente, ante cambios de consigna (-10 a +10 A en  $t=5$  ms) y ante cortocircuito ( $t=10$ ms)

El siguiente paso es el estudio de las técnicas de regulación para la tensión de salida. Cuando el objetivo es conseguir que el inversor se comporte como fuente de tensión lo más cercana a ideal, se ha de controlar de forma que la tensión de salida siga una referencia con el mínimo error frente a perturbaciones.

Muy importante es la insensibilidad ante cambios en la corriente de salida, lo que confiere el carácter de fuente de tensión con impedancia de salida despreciable.

La variedad de técnicas de control aplicables es muy amplia [13]-[19]. Atendiendo a las variables de estado sobre las que se regula se pueden clasificar entre aquellas con regulación de la corriente de bobina y tensión de condensador y las que sustituyen la corriente de bobina por la corriente de condensador. Desde otro punto de vista se puede hablar de técnicas de banda ancha y técnicas de banda estrecha o selectiva. Se enfatizan y destacan las opciones que se basan en la prealimentación de perturbación (corriente de salida), justificando la ventaja de esta técnica. Cuando no es posible la medida de corriente de salida se puede optar por la estimación mediante un observador y se ilustra esta posibilidad con modelos y simulaciones.



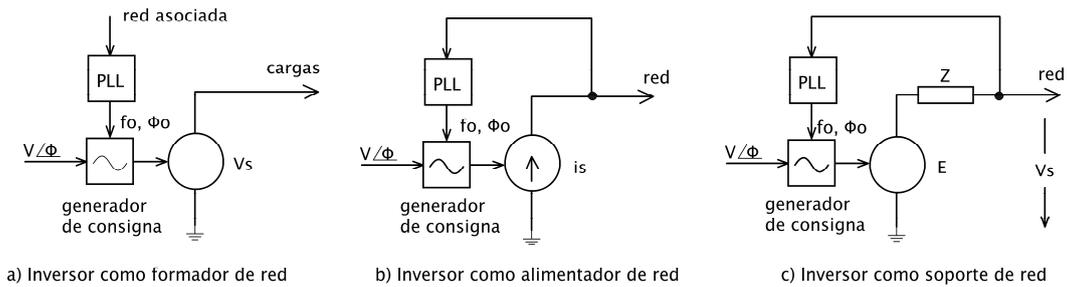
**Figura 11** Esquema de regulador discreto, con observador de corriente de salida y predictor

Se acaba este apartado planteando el diagrama de bloques completo de un regulador analógico, con generación de PWM por modulación natural y prealimentación directa de corriente de salida como un esquema óptimo de regulación, que permite obtener las mejores prestaciones teóricas de salida. Es posible escribir ficheros de cálculo que a partir de parámetros de entrada determinen reguladores, cargables sobre modelos de simulación. Esta misma operativa puede ampliarse para control digital, obteniendo modelos discretos y calculando reguladores que incluyen predictor de corriente de bobina y, en su caso, observador de corriente de salida (Fig. 11). De esta forma se puede llegar a automatizar el diseño de todo el regulador para control digital y con estimación de corriente de salida por medio de observador. Mediante modelos de simulación en los que se reproduce el ensayo con carga distorsionante es posible comparar prestaciones, fundamentalmente la distorsión armónica de la corriente de salida [4].

En inversores que han de actuar en sincronización entre sí o con redes eléctricas, la generación de consigna no es un proceso trivial, se ha de generar una consigna sinusoidal que ha de ajustarse en frecuencia y fase a referencias externas [20][21]. Este aspecto se analiza también y se plantean algunas simulaciones ilustrativas de generador de consigna que sincroniza mediante PLL con una señal captada desde una red eléctrica externa al inversor y filtrada de forma adaptativa para obtener primer armónico.

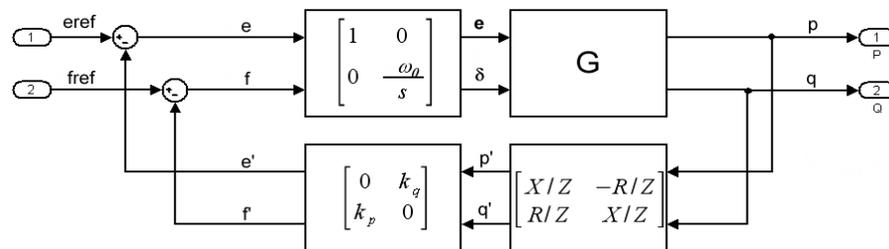
#### 4. Los inversores en interacción con redes eléctricas

En esta parte se cambia totalmente el punto de vista pasando de una visión de detalle e interna de los inversores a una visión externa, como elemento que se integra en redes eléctricas. Es posible modelar los inversores como fuentes de corriente alterna controladas, en modo tensión o modo corriente. En cuanto a la interacción entre un inversor y una red eléctrica se pueden distinguir tres modos de funcionamiento fundamentales: formador de red, alimentador de red y soporte de red (Figura 12) [22].



**Figura 12** Modos de fundamentales de funcionamiento de un inversor en relación con la red eléctrica externa

También las técnicas de modelado y simulación cambian, pasando a hacer uso de la teoría de fasores variables en el tiempo [23] y simulando el comportamiento mediante modelos simplificados del inversor, como fuentes de tensión o corriente reguladas (aunque se contrastan resultados con simulaciones que incluyen modelos detallados del inversor). Se analiza la interacción entre inversores y red cuando éstos se controlan por el método de caída, clásico en puesta en paralelo de generadores y conexión de éstos a redes eléctricas, contemplando las particularidades de este método en el caso de inversores [24][25]. El modelado por la técnica de fasores variables en el tiempo permite obtener el modelo representado en Figura 13, para un inversor en el que se aplica el método de caída. Esta técnica de modelado descubre también la posible inestabilidad de este sencillo método de control, para impedancia de salida inductiva y poco amortiguada, característica que no se deduce de análisis cuasi-estático. A diferencia de los generadores electromecánicos, en los inversores la impedancia de salida puede sintetizarse por control, pudiendo optar por impedancia de tipo inductivo o resistivo [24][26]. El comportamiento de sistemas de inversores conectados en paralelo entre sí o con una red eléctrica se puede contrastar comparando los resultados de simulación de modelos simplificados, basados en fuentes de tensión ideales y de modelos que utilizan modelos de inversor regulado, detallados



**Figura 13** Modelo de inversor al que se aplica el método de caída.

El método de caída y sus variantes, incluso las más sofisticadas, se basan en todo caso en la existencia de una impedancia de salida de convertidor no despreciable, esta impedancia disminuye la rigidez de la tensión de salida y por tanto aumenta la distorsión para cargas no lineales o variables. Estos inconvenientes se pueden superar cuando se incorpora control distribuido a los sistemas de inversores, tanto en el caso de conjuntos redundantes interconectados por líneas de reducida impedancia, como en el caso de convertidores que se encuentra conectados en distintos puntos de una red o mini-red a través de líneas de impedancia apreciable. De esta forma, los convertidores intercambian información en tiempo real por medio de redes de comunicaciones, técnica que también es de aplicación en sistemas en los que han de interactuar con generadores conectados a la misma red [27]. La generalización y extensión de estas técnicas de control distribuido, en las que se ha de aplicar una visión de sistema a la vez que se ha de prestar atención a detalles de sincronización, determinismo y tolerancia a fallos, sin perder de vista los procesos regulación e intercambio de energía, es un campo de interés para los autores de este trabajo.

## 5. Conclusiones y trabajo futuro

En los apartados anteriores se han planteado la organización y método didáctico con el que se puede abordar la enseñanza especializada en control de convertidores de energía combinando el punto de vista interno y la perspectiva como sistema integrable en redes eléctricas. Esta aproximación se apoya en gran parte en la práctica por medio de programas de cálculo y modelos de simulación. Se ha avanzado en la preparación de programas y modelos de referencia. Los programas de cálculo o modelado se crean como ficheros .m de MATLAB y los de simulación como ficheros .mdl de SIMULINK, con elementos de distintos “blocksets” especialmente de SimPowerSystems, pudiendo utilizar también algunos elementos desarrollados a medida cuando los incluidos en la biblioteca del programa no resultan apropiados.

De cara a comprobar la viabilidad de la aproximación, se ha planteado realizar un seminario en la Escuela Universitaria de Ingeniería de Vitoria-Gasteiz en el segundo cuatrimestre de 2010. Se está realizando un análisis económico del coste de implantación de las herramientas de simulación en un aula para 20 estudiantes con herramientas de simulación compartidas en red. El coste de una licencia académica colectiva para clase de 20sim se sitúan en el entorno de los 1000 € dependiendo de versión y opciones, aunque existe una versión gratuita de evaluación que permite desarrollar modelos en grafo de enlace. El coste de una licencia concurrente para las herramientas de Mathworks (MATLAB, SIMULINK, Simpower Systems, etc.) para un aula de 20 estudiantes se sitúa en el entorno de los 250 €por alumno.

## Referencias

- [1] Y. Ito, S. Kawauchi. *Microprocessor-Based Robust Digital Control for UPS with Three-Phase PWM Inverter*. IEEE Transactions on Power Electronics Vol. 10, No 2, March 1995.
- [2] P.J. Gawthrop, G.P. Bevan. *Bond-graph modeling*. Control Systems Magazine, IEEE Vol. 27, No 2, Abril 2007.
- [3] J.M.Guerrero, L. Garcia de Vicuna, J. Uceda. *Uninterruptible power supply systems provide protection*. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2007.
- [4] Norma IEC 62040-3:1999 *Uninterruptible power systems (UPS) –Part 3: Method of specifying the performance and test requirements*, 1999, CEI/IEC
- [5] D. Grahame and T. A. Lipo. *Pulse width modulation for power converters: principles and practice*. 2003, John Wiley. ISBN: 0471208140.
- [6] Van de Sype, D.M.; De Gussemé, K.; Van den Bossche, A.P.; Melkebeek, J.A.. *Small-signal Laplace-domain analysis of uniformly-sampled pulse-width modulators*. ,IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference PESC 04.
- [7] G. C. Goodwin, S. F. Graebe, M. E. Salgado. *Control System Design*. 2001, Prentice Hall

- [8] P.A. Dahono, A. Purwadi, Qamaruzzaman. *An LC filter design method for single-phase PWM inverters.*, Proceedings of 1995 International Conference on Power Electronics and Drive Systems, pp.571-576 vol.2, 21-24 Feb 1995.
- [9] J. Sun, D. M. Mitchell, F. Greuel, P. T. Krein, and R. M. Bass. *Averaged Modeling of PWM Converters Operating in Discontinuous Conduction Mode.* IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 16, No. 4, 2001, pp. 482-492
- [10] J. Sun and H. Grotstollen. *Averaged modeling of switching power converters: reformulation and theoretical basis.* in *Proc. IEEE PESC'92*, 1992, pp. 1166–1172.
- [11] D.G.Holmes,D.A. Martin. *Implementation of a direct digital predictive current controller for single and three phase voltage source inverters.* Conference Record of the 1996 IEEE Industry Applications Conference, 1996.
- [12] S. Buso, S. Fasolo, P. Mattavelli. *Uninterruptible power supply multiloop control employing digital predictive voltage and current regulators.* 2001, IEEE Transactions on Industry Applications
- [13] Ryan, M.J.; Brumsickle, W.E.; Lorenz, R.D. *Control topology options for single-phase UPS inverters.* 1997, IEEE Transactions on Industry Applications, vol 33.
- [14] N. M. Abdel-Rahim, J.E. Quaicoe. *Analysis and design of a multiple feedback loop control strategy for single-phase voltage-source UPS inverters.* 1996, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol 11.
- [15] Heng Deng; R. Oruganti, D. Srinivasan. *Modeling and Control of Single-Phase UPS Inverters: A Survey.* 2005, International Conference on Power Electronics and Drives Systems, 2005. PEDS 2005
- [16] A. Kawamura, T. Yokoyama. *Comparison of five different approaches for real time digital feedback control of PWM inverters.* Conference Record of the 1990 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting
- [17] Poh Chiang Loh; M.J. Newman, D.N. Zmood, D.G. Holmes. *A comparative analysis of multiloop voltage regulation strategies for single and three-phase UPS systems.* 2003, IEEE Transactions on Power Electronics, Vo 18
- [18] C. Rech, H.A. Grundling, J.R. Pinheiro. *Comparison of discrete control techniques for UPS applications.* 2000, Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting
- [19] P. Mattavelli. *An improved deadbeat control for UPS using disturbance observers.* IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.52
- [20] B.P. McGrath, D.G. Holmes, J.J.H. Galloway. *Power converter line synchronization using a discrete Fourier transform (DFT) based on a variable sample rate.* IEEE Transactions on Power Electronics, vol.20, no.4, pp. 877-884, July 2005
- [21] A. Timbus, R. Teodorescu, F. Blaabjerg, M. Liserre. *Synchronization Methods for Three Phase Distributed Power Generation Systems. An Overview and Evaluation.* Power Electronics Specialists Conference, 2005. PESC '05. IEEE 36th.
- [22] K. De Brabandere. *Voltage and frequency droop control in low voltage grids by distributed generators with inverter frond-end.* PhD. Thesis, Universidad Católica de Lovaina, ISBN 90-5682-745-6, October, 2006
- [23] V. Venkatasubramanian, H. Schattler, J. Zaborszky. *Fast time-varying phasor analysis in the balanced three-phase large electric power system.* IEEE Transactions on Automatic Control, vol.40, no.11, pp.1975-1982, Nov 1995
- [24] K. De Brabandere, B. Bolsens, J. Van den Keybus, A. Woyte, J. Driesen, and R. Belmans. *A voltage and frequency droop control method for parallel inverters.* IEEE Transactions on Power Electronics, vol.22, no.4, pp.1107-1115, Julio 2007.
- [25] J. M. Guerrero, J. Matas, L. Garcia de Vicuna, M. Castilla, J. Miret. *Decentralized Control for Parallel Operation of Distributed Generation Inverters Using Resistive Output Impedance.* 2007, IEEE Transactions on Industrial Electronics, pp 994-100
- [26] J. M. Guerrero; L. GarcíadeVicuna; J. Matas, M. Castilla, J. Miret. *Output Impedance Design of Parallel-Connected UPS Inverters with Wireless Load-Sharing Control.* IEEE Transactions on Industrial Electronics, , vol.52, no.4, pp. 1126-1135, Aug. 2005
- [27] R. Sebastian, J. Quesada. *Distributed control system for frequency control in an isolated wind system.* Renewable Energy, 2006, 31 (3), pp. 285-305.