

# Plataforma de laboratorio para prácticas de filtrado activo de potencia

Víctor M. Moreno Sáiz, *Member, IEEE* y Alberto Pigazo López, *Member, IEEE*

**Abstract**— Non-linear electrical loads connected to power systems introduce non-active power components. The current harmonics and reactive power deteriorate the power quality and reduce the electrical system efficiency. These non-desirable effects can be avoided by using shunt active power filtering. This is a relevant topic in electrical and power electronics systems and, as a consequence, it must be included in undergraduate engineering courses.

The aim of this paper is to present a laboratory set-up of a three-phase three-wire shunt active power filter (SAPF) which allows undergraduate and postgraduate engineering students to evaluate experimentally the performance of different control algorithms in SAPFs. As an example a complete didactic application is described using the developed laboratory set-up.

**Index Terms**— Power filters, Digital control, Power engineering education.

## I. INTRODUCCIÓN

LA calidad de la energía eléctrica en una red de distribución o una instalación industrial puede verse deteriorada cuando se conectan cargas no lineales tales como variadores de frecuencia para motores de alterna con etapa de rectificación [1] o la red incorpora sistemas de generación distribuida como parques eólicos que se conectan al sistema a través de convertidores de potencia [2]. Los principales problemas relacionados con la calidad de la energía se deben a la componente de potencia reactiva y a los armónicos de corriente y tensión. La potencia reactiva reduce la capacidad de transporte de las líneas e incrementa las pérdidas eléctricas. Entre otros efectos negativos, las componentes armónicas incrementan la temperatura de los transformadores y generan variaciones del par en máquinas eléctricas de alterna [3].

Estos problemas se agudizan de manera particular en el caso de sistemas eléctricos de potencia aislados, como es el caso de los buques, donde pueden presentarse altos niveles de distorsión armónica cuando su planta eléctrica incorpora cargas no lineales. Un caso especial lo constituyen los buques con propulsión eléctrica por el gran número de cargas no

lineales y de elevada potencia que incorporan. Este tipo de perturbaciones pueden provocar fallos o un funcionamiento incorrecto de los equipos electrónicos sensibles a las mismas como pueden ser los equipos de navegación y dar origen a accidentes marítimos. Varias sociedades de clasificación han considerado estos posibles efectos provocados por la distorsión armónica imponiendo severos límites a la tasa máxima permitida en la señal de tensión. La sociedad “*American Bureau of Shipping*” ha impuesto desde enero de 2005 un límite del 5% mientras que “*Lloyd’s Register*” la establece en un 8%.

Para lograr una atenuación de las componentes de corriente no deseables y llevarlas a niveles por debajo de los máximos permitidos [4] se pueden emplear filtros de potencia pasivos, activos o híbridos. El proceso de diseño de las soluciones pasivas, como son los bancos de condensadores o los filtros resonantes, precisa conocer las características de la carga perturbadora y la impedancia de la carga en el punto de conexión a la red. En el caso de que se produzcan variaciones en las condiciones del sistema eléctrico pueden originarse resonancias debidas a los filtros instalados que harían necesario rediseñar los mismos para el nuevo escenario. En este sentido, los filtros activos de potencia, a pesar de su mayor complejidad y coste, consiguen optimizar la mitigación independientemente de la configuración de la red.

El propósito de este artículo es la descripción de las prácticas de laboratorio sobre una plataforma didáctica desarrollada al efecto para el estudio experimental de las técnicas de control de filtros activos de potencia por los estudiantes de ingeniería eléctrica y naval. La plataforma corresponde concretamente a una estructura general de filtro de potencia paralelo para instalaciones trifásicas a tres hilos que permite la aplicación de diferentes técnicas digitales de control, analizar su comportamiento y evaluar sus prestaciones de forma experimental.

## II. ESTRUCTURA GENERAL DE UN FILTRO ACTIVO DE POTENCIA PARALELO (FAPP)

La estructura general de un FAPP trifásico a tres hilos se muestra en la Figura 1. El controlador digital tiene como funciones [5]: A) evaluar la corriente de referencia  $i_c^*$  que debe ser inyectada en el punto de conexión de la carga no lineal para compensar las componentes no activas y mantener la capacidad de compensación del FAPP, B) controlar que la corriente inyectada  $i_c$  se corresponde con la de referencia y C)

Víctor M. Moreno y Alberto Pigazo están en el Dep. de Electrónica y Computadores, (Universidad de Cantabria), Escuela Técnica Superior de Náutica c/ Gamazo, 1 39004 Santander (Cantabria) ESPAÑA Tel: 34 942 201338 / Fax: 34 942 201303 / email: [morenov@unican.es](mailto:morenov@unican.es).

DOI (Digital Object Identifier) Pendiente

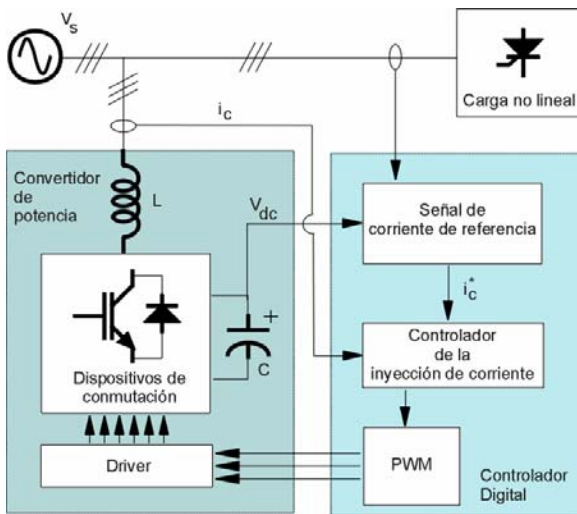


Fig. 1. Estructura general de un filtro de potencia paralelo

generar las señales de control de los dispositivos de potencia mediante un modulador por anchura de pulsos (PWM).

### A. Corriente de referencia

La corriente de referencia se compone de las componentes que se pretenden eliminar de la corriente de la carga, las cuales deben ser inyectadas en contrafase en el punto de conexión común y, además, esta corriente incluye una pequeña componente de corriente activa para mantener la tensión de continua o, lo que es lo mismo, para restituir las pérdidas del filtro [6] y mantener su capacidad de compensación.

Las prestaciones del filtro dependen en gran medida del método empleado para obtener la corriente de referencia en tiempo real. Se han presentado diferentes técnicas de cálculo de  $i_c^*$  entre las cuales destacan, por ser las más empleadas: la teoría de la potencia instantánea activa y reactiva ( $pq$ ), debida a Akagi et al. [7] [8], la transformación de las señales de corriente a ejes de referencia rotatorios y síncronos con la frecuencia fundamental (SRF) [9] [10], la teoría Fryze-Buchholz-Depenbrock (FBD) [11] [12] y la transformada rápida de Fourier (DFT) [13] [14].

En la tabla I se muestra un resumen de las características más importantes que deben considerarse, desde el punto de vista de la implementación digital del controlador, a la hora de optar por uno u otro método.

Un aspecto que debe ser considerado en la selección del controlador del FAPP es la necesidad de un sistema de sincronización (*Phase Locked Loop*, PLL). El método  $pq$  no requiere sincronización con la red eléctrica al emplear los valores instantáneos de las tensiones y corrientes en el punto de conexión común (PCC). Los métodos FBD y DFT requieren cierto grado de sincronización para establecer las “ventanas” sobre las que operan. La sincronización con la red eléctrica es fundamental en el caso del método SRF y, en particular, cuando se realiza compensación selectiva de los armónicos de corriente de la carga. Los métodos  $pq$  y SRF requieren la utilización de un filtro paso alto (*High Pass Filter*, HPF) para la determinación de la corriente de

TABLA I  
ALGORITMOS DE CÁLCULO DE LA CORRIENTE DE REFERENCIA

Método	Estructura básica	PLL	HPF	Selectivo
$pq$	$abc \rightarrow \alpha\beta \rightarrow \begin{cases} p \rightarrow \text{HPF}_1 \\ q \end{cases} \rightarrow \alpha\beta$	no	++	no
SRF	$abc \rightarrow \alpha\beta \rightarrow \begin{cases} d \rightarrow \text{HPF}_2 \\ q \end{cases} \rightarrow \alpha\beta$	++	+	+
FBD	$i_{a,v}(t) = i_{L,v}(t) - \frac{\sum_{m=1}^3 \int_0^T v_m(t) i_m(t) dt}{\sum_{m=1}^3 \int_0^T v_m^2(t) dt} v_v(t)$	+	no	no
DFT	$abc \rightarrow \begin{cases} \sum_{i=1}^{\infty} a_i(t) \\ \sum_{i=1}^{\infty} b_i(t) \\ \sum_{i=1}^{\infty} c_i(t) \end{cases} \rightarrow abc$	+	no	++

referencia haciendo más complicado su diseño en el caso del método  $pq$ . Los métodos FBD y DFT no emplean etapas de filtrado. Los métodos  $pq$  y FBD originales no permiten realizar la compensación selectiva de los armónicos de corriente de la carga. En caso de ser necesaria, y para un conjunto de armónicos limitado, se pueden emplear varios SRFs sintonizados a las frecuencias de los armónicos. En este sentido la solución más completa es la basada en la DFT.

### B. Controlador de la corriente de inyección

El controlador de la corriente de inyección debe asegurar que la corriente inyectada,  $i_c$ , corresponde a la de referencia,  $i_c^*$ . Se pueden aplicar diferentes técnicas para el control de la corriente de compensación. Así, en la literatura se han propuesto métodos, como los basados en redes neuronales o en lógica borrosa, en los que la dificultad reside en el proceso previo de diseño del controlador. También se han presentado FAPP que emplean un controlador *deadbeat*, donde se requiere un modelo preciso de los enlaces de corriente del FAPP (inductancias). Teniendo en cuenta el carácter didáctico de la plataforma de laboratorio desarrollada, se han considerado dos tipos básicos de controladores:

- el controlador PI en un sistema de referencia síncrono [15][16],
- los controladores resonantes en un sistema de referencia estacionario [17][18].

La estructura general de un controlador de la inyección de corriente en un sistema trifásico a tres hilos se muestra en la Figura 2. El primer tipo de controlador opera en un marco de referencia rotatorio a la frecuencia fundamental de la red y sincronizada con la señal de tensión. En consecuencia, la corriente de inyección medida debe ser transformada a este marco mediante las transformaciones de Clarke y Park (T). Además, la señal de referencia de corriente debe ser representada en un marco de referencia síncrono (SRF). El controlador aplica un PI a cada señal de error de las componentes en este marco y la salida del controlador de la corriente de inyección se obtiene después de aplicar la transformada inversa  $T^{-1}$ .

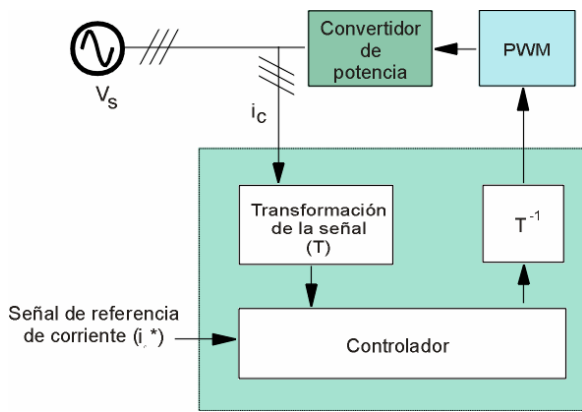


Fig. 2. Estructura general de un controlador de la inyección de corriente en un sistema trifásico a tres hilos

Pueden obtenerse resultados equivalentes aplicando controladores resonantes. En este caso la transformación de Park puede evitarse y la parte integral en el PI es reemplazada por un resonador [16], reduciendo la carga computacional del controlador. Esta estructura requiere una representación de la señal de corriente de referencia en un marco de referencia estacionario ( $\alpha\beta$ ).

C. Modulador por anchura de pulso (PWM)

El patrón de las señales de puerta que se aplica a los dispositivos electrónicos de potencia puede ser generada mediante el uso de un modulador por anchura de pulsos (PWM). Las técnicas de modulación más empleadas en filtros activos de potencia son la modulación PWM con portadora triangular y la modulación por espacio vectorial (SV-PWM) [19].

Los moduladores PWM con portadora triangular comparan la salida del controlador de la inyección de corriente con una señal portadora triangular de alta frecuencia, resultando una forma de onda rectangular de ciclo de trabajo variable y frecuencia constante. En sistemas a tres hilos las prestaciones del filtro activo de potencia pueden ser mejoradas introduciendo una componente de secuencia cero en el modulador [19].

La técnica de modulación por espacio vectorial, en principio empleada en máquinas eléctricas, opera en un marco estacionario y no precisa calcular la transformada inversa de Clarke en el controlador de inyección de corriente. Esta técnica representa los estados de conmutación de los dispositivos de potencia en un marco complejo estacionario. Una vez que los períodos de conmutación están establecidos el tiempo se distribuye entre dos vectores de conmutación consecutivos lo que permite determinar la fase de la salida de tensión del convertidor de potencia. La magnitud se determina mediante los estados de conmutación asociados a los vectores no activos.

III. PLATAFORMA DE LABORATORIO DESARROLLADA

La estructura de la plataforma para prácticas de laboratorio desarrollada para filtros activos de potencia trifásicos a tres hilos, siguiendo el esquema general mostrado en la Figura 1,

se puede observar en la Figura 3. Consta de cuatro bloques: sistema de potencia, convertidor de potencia del filtro activo, controlador e interfaz de usuario. En esta sección se detallan la estructura y funcionalidades de cada uno de estos bloques.

A. Sistema de potencia

Este bloque corresponde a la carga eléctrica no lineal y al sistema de generación de potencia. Las tensiones de alimentación de la carga y las corrientes de línea se monitorizan a través de una tarjeta de acondicionamiento de señales. Las señales de tensión que se aplican a las cargas no lineales son generadas por la fuente de alimentación trifásica programable HP-6834 B. Esta fuente puede generar señales de tensión con desequilibrios y niveles de armónicos determinados así como transitorios (huecos de tensión). Como carga no lineal se emplea un rectificador trifásico no controlado de onda completa. Su patrón de consumo de corriente se puede modificar cambiando el tipo de carga conectada a su salida según sea de tipo fuertemente inductiva o capacitiva.

B. Convertidor de potencia

El convertidor de potencia está formado por una tarjeta TPEB-4 de Concept. Esta tarjeta consiste en un puente completo con transistores IGBT del tipo BSM74GD120DN2 (1200V, 75A), una tarjeta TPD-1 para el control del puente de IGBTs, un banco de condensadores con una capacidad equivalente de 550  $\mu$ F y 3 enlaces de corriente (Inductancias de 5 mH). Se ha diseñado una tarjeta de control que permite la comunicación entre el DSP y la tarjeta TPD-1.

C. Controlador

El controlador del filtro activo está constituido por el software de control, que debe ser desarrollado por los alumnos basándose en 3 librerías software diseñadas al efecto, y la tarjeta controladora basada en DSP donde se ejecuta dicho software.

La tarjeta de control es una tarjeta DSP interna, modelo PC31 de Innovative Integration, Inc. y diseñada sobre el DSP TMS320C31 de Texas Instruments. El entorno de desarrollo suministrado con la tarjeta PC31 DSP (compiladores, librerías software, programas para la monitorización de la memoria, etc...) se ha completado con módulos de software específicos para estas aplicaciones didácticas. Los algoritmos empleados para el cálculo de la corriente de referencia, el controlador de la corriente de inyección y la modulación por anchura de pulsos se han implementado en lenguaje C y están disponibles como librerías que se incluyen en el programa principal que desarrollan los estudiantes.

A continuación se muestra el pseudocódigo correspondiente a un ejemplo de programa principal:

```
#include <time.h>
#include <math.h>
#include <reference.h>
#include <injection.h>
#include <pwm.lib>
```

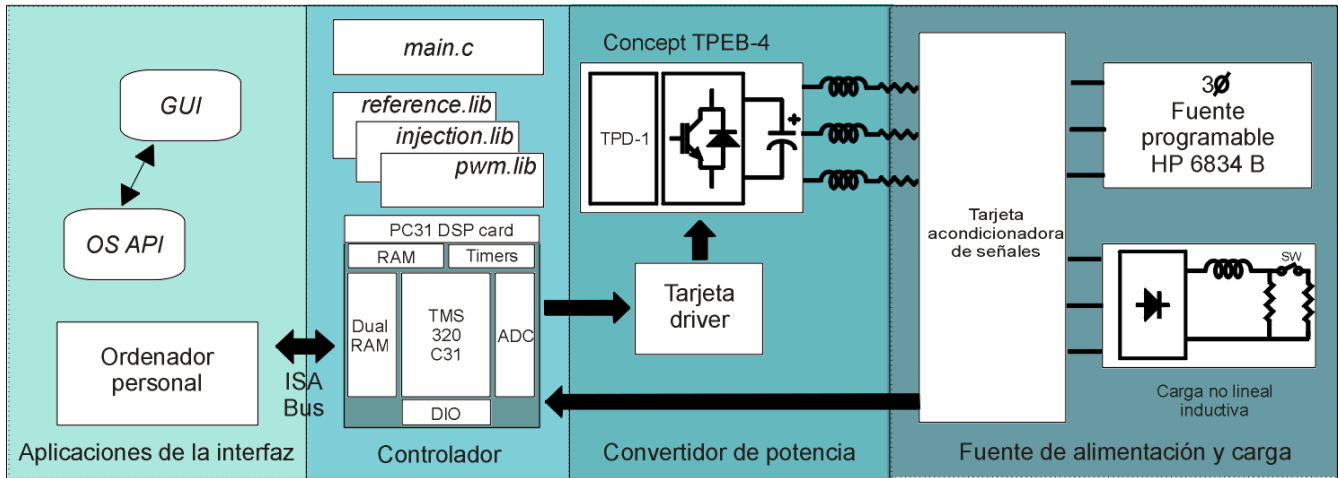


Fig. 3. Estructura general de la plataforma para prácticas de laboratorio desarrollada

```
//definición de constantes
#define samplesCycle 80
...
//rutinas de interrupción
#define PWM_init c_int_99
void c_int99();
#define PWM_change c_int_89
void c_int89();
...
//definiciones de variables
AIO_PAIR muestra1,muestra2,muestra3,muestra4;
...
//programa principal
void main(){
    inicializa_calculo_corriente_referencia
    inicializa_los_timers_del_DSP
    sincronizacion_con_el_host_PC
    habilita_las_interrupciones

    while(!finaliza){ //Finaliza el programa de control
        while(!para){ //Detiene la compensación
            if (siguiente==1){ //Espera al siguiente periodo
                adquiere_señales

                //pérdidas en el condensador
                ...
                iPerdidas=PI(error,acumulador,Kp,Ki)
                ...
                //calculo de la conductancia
                G=conductanciaFBD(iA,iB,iC,vA,vB,vC);
                ...
                //corriente de referencia por fase
                iAref=referenciaFBD(G,iA,iPerdidas,vA);
                ...
                //control de la corriente de inyección
                oA=PI(errorIA,acumuladorIA,Apia.KiIA);
                ...
                //PWM triangular
                calculaTiemposPWMtri(oResA,oResB,oResC,vDC,tiempos);
                ...
                Sincronización_con_el_host_PC
                Prepara_el_siguiente_intervalo
            }
        }
    }
}
```

TABLA II  
SESIONES PRÁCTICAS DE LA ASIGNATURA

Sesión	Práctica
P1	Rectificador no controlado
P2	Rectificador controlado de baja frecuencia
P3	Convertidores dc/dc
P4	Rectificador controlado PWM
P5	Control de motores dc
P6	Control de motores ac
P7	Filtro activo de potencia paralelo

En el fichero correspondiente al programa principal se “incluyen” las librerías que van a ser empleadas. Entre éstas se encontrarán las librerías de funciones suministradas al estudiante: *reference.h*, *injection.h* y *pwm.h*. En la primera se dispone de funciones que permiten calcular la corriente de referencia mediante los métodos pq, SRF, FBD y DFT.

Asimismo, la librería suministra funciones para inicializar, en caso necesario, cada uno de los algoritmos y realizar determinadas transformaciones de señales, como la transformación de Park para el método SRF. La librería *injection.h* contiene las funciones necesarias para el control de la corriente de inyección. Finalmente, *pwm.h* permite el cálculo de los tiempos que el convertidor de potencia debe estar en cada estado de conmutación dependiendo del tipo de modulación seleccionada.

Las rutinas de interrupción *PWM\_init* y *PWM\_change* permiten recoger las interrupciones generadas por dos de los *timer* de la tarjeta de DSP y son las encargadas de gobernar el proceso de modulación. Estas funciones se le suministran al estudiante ya implementadas. El programa principal está constituido por un ejecutivo cíclico que se sincroniza con una de las interrupciones, recogida por *PWM\_init*, y tras realizar la adquisición de señales, almacenadas en estructuras de datos de tipo *AIO\_PAIR*, se calcula la corriente que debe consumir el FAPP para mantener su capacidad de compensación y posteriormente, mediante la conductancia de la carga, se evalúa la corriente de referencia para la compensación mediante la función *referenciaFBD*. La corriente inyectada en

el punto de conexión es comparada con la corriente de referencia previamente calculada obteniendo la señal de error para cada fase *errorIA* que se utiliza dentro de un bloque de control PI. Finalmente se evalúan los tiempos que el convertidor de potencia debe permanecer en cada estado de conmutación mediante la función *calculaTiemposPWMtri*.

#### D. Interfaz de usuario

El estado del filtro activo de potencia paralelo (*controlador inicializado, compensador detenido y compensador activado*), así como su configuración (en caso de compensación selectiva de armónicos, los ordenes armónicos seleccionados) pueden establecerse en tiempo real mediante una interfaz gráfica de usuario (GUI) diseñada al efecto.

La GUI se ejecuta en el PC de forma local y ha sido diseñada mediante la técnica de programación orientada a objetos (OOP). Utiliza la interfaz de aplicaciones de programas (API) para manejar los recursos dados por el sistema operativo *Windows*: p.e. escritura en fichero de registros de las señales monitorizadas por el controlador. Esta interfaz de usuario permite: seleccionar el controlador a ensayar, configurar el FAPP (corriente de referencia, tensión de continua, selección de los armónicos de la carga a compensar y, en su caso, la compensación de la potencia reactiva), configurar las protecciones software (enlace de continua, tensión máxima y corriente máxima de compensación), monitorizar en tiempo real las variables internas críticas del controlador (medidas de las señales de potencia, corriente de referencia o ciclo de trabajo aplicado en la modulación) y registrar las medidas tomadas para su posterior procesamiento.

### IV. EJERCICIO DE PRÁCTICA DE LABORATORIO

En esta sección se describe, a modo de ejemplo, una de las prácticas de laboratorio programada en la asignatura Electrónica de Potencia de la titulación de Ingeniero Técnico Naval. Esta asignatura, de 3 créditos teóricos y 1.5 créditos prácticos, introduce a los estudiantes en las aplicaciones industriales de la electrónica de potencia. La tabla II muestra las experiencias de laboratorio desarrolladas como parte práctica de la asignatura.

La práctica descrita en esta sección, filtrado activo de potencia paralelo (P7), corresponde a la última sesión de prácticas desarrollada. En este punto de la asignatura, el estudiante maneja dispositivos electrónicos de potencia, sus técnicas de control y algunas técnicas avanzadas de control a nivel elemental. En este sentido, las tareas que debe realizar el estudiante durante el desarrollo de esta práctica se han simplificado en gran medida de modo que el nivel de dificultad no sea excesivo. La sesión práctica P7 se lleva a cabo sobre la plataforma de laboratorio desarrollada al efecto y que permite al alumno ensayar diferentes técnicas de control y comprobar sus prestaciones teniendo unos conocimientos básicos de programación en lenguaje C. En una primera aproximación, y tras la introducción de los conceptos básicos del filtrado activo (funcionalidades que debe desarrollar el

controlador y modo de implementarlas), los alumnos, mediante simulación en *MatLab/Simulink*, ajustan los parámetros de control de acuerdo a las especificaciones suministradas.

A continuación, los estudiantes, en grupos de 2 ó 3, trabajan sobre la plataforma FAPP (Figura 4) desarrollada empleando las herramientas suministradas por Innovative Integration, Inc. (compilador, linker, etc) para construir sus propios programas principales, empleando la estructura base que les es suministrada. Tras una depuración del código bajo la supervisión del profesor se pasa a la realización de los ensayos de laboratorio y a la obtención de resultados. Finalmente, los alumnos presentarán una memoria donde se refleje el diseño realizado y los resultados experimentales obtenidos.

En el ejercicio guiado que se presenta en esta sección, los estudiantes deben analizar las características básicas de compensación del controlador aplicando el método FBD para la obtención de la corriente de referencia, un controlador PI en un sistema de referencia síncrono para la regulación de la corriente de inyección y un modulador PWM sinusoidal. El objetivo de la compensación en esta práctica de laboratorio consiste en la obtención de una tasa de distorsión armónica en la corriente de línea (ITHD) idéntica a la tasa de distorsión de la tensión (VTHD) en el punto de conexión. Las pruebas deben realizarse en estado estacionario y en condiciones dinámicas de la carga.

Con el filtro de potencia inactivo el estudiante mide y registra las formas de onda de tensión y corriente (Figura 5(a) y Figura 5(b) respectivamente). En este caso, la tensión de fase aplicada es una señal sinusoidal pura mientras que la corriente de la carga es prácticamente una señal cuadrada. La fuente de potencia programable HP-6834-B permite visualizar el espectro de la tensión y la corriente medida (Figura 6). Las tasas de distorsión armónica de tensión y corriente medidas son 1.1 % y 29.38% respectivamente. La impedancia equivalente en el punto de conexión común (PCC) reduce la pendiente de la corriente de carga durante la conmutación de los diodos rectificadores reduciendo la ITHD obtenida en comparación con el valor teórico evaluado mediante simulación.

Mediante el empleo de las librerías software suministradas (básicamente *reference.lib*, *injection.lib* and *pwm.lib*), el estudiante debe generar un fichero (*main.c*) que contiene el programa principal correspondiente al controlador digital. La interfaz gráfica de usuario (GUI) de la plataforma, que se muestra en la Figura 7, permite la descarga del programa de control en la tarjeta procesadora. Una vez el código es cargado el estudiante debe establecer los parámetros de configuración del controlador del filtro activo (tensión en el nivel de continua, constantes del controlador de inyección de corriente  $K_p$  y  $K_i$ , máxima tensión permitida en el condensador de almacenamiento y máxima corriente de inyección). Estos parámetros pueden ser ajustados on-line con lo que se puede observar de forma inmediata el efecto sobre el comportamiento del filtro y comprobar la influencia en sus prestaciones.

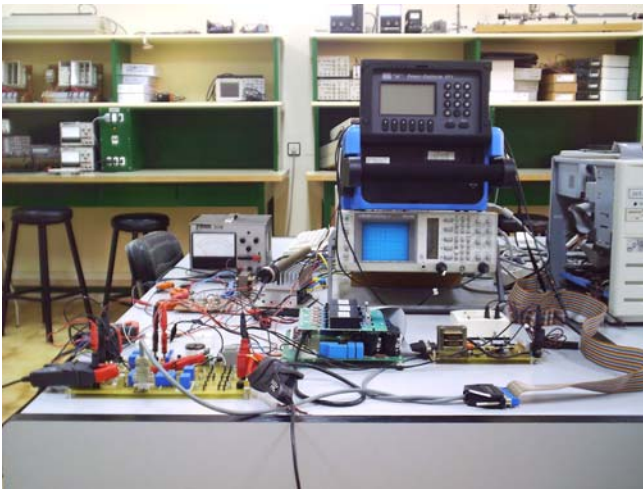


Fig. 4. Plataforma de laboratorio

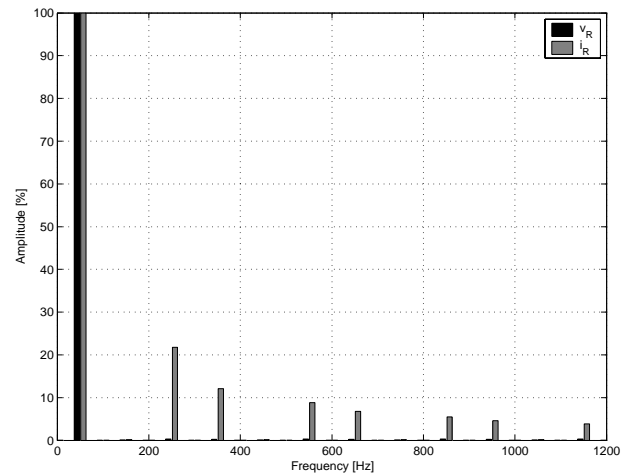


Fig. 6. Espectro de las señales de tensión y corriente en el PCC

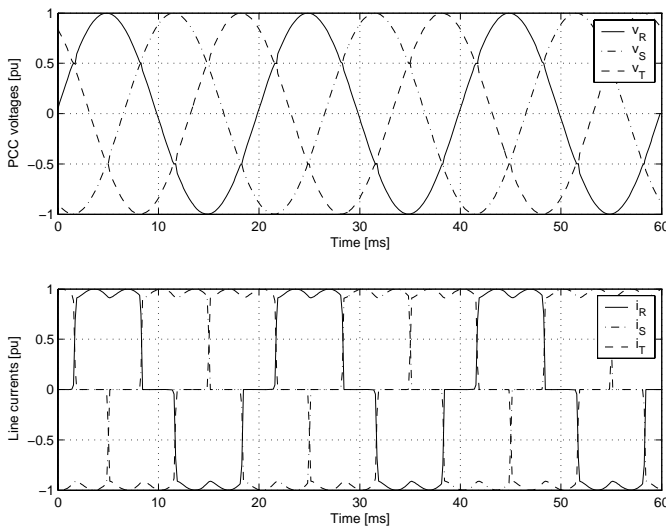


Fig. 5. Señales en el punto de conexión común (PCC): a) Tensiones de fase y b) corrientes de línea

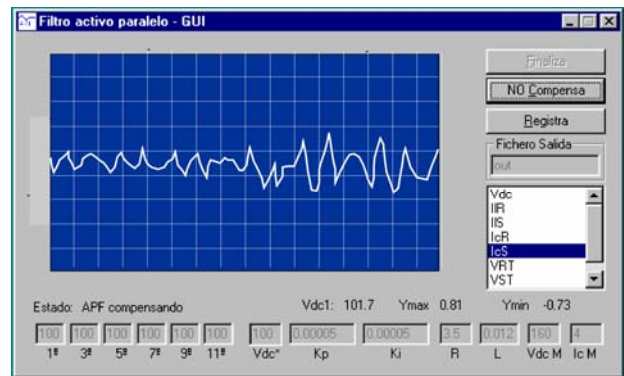


Fig. 7. Interfaz Gráfica de Usuario (GUI)

Las señales de entrada y salida del controlador, que pueden ser visualizadas en pantalla en tiempo real, son: la tensión de continua ( $V_{dc}$ ), las tensiones entre líneas ( $V_{RT}$  y  $V_{ST}$ ) y las corrientes de compensación ( $I_{IR}$ ,  $I_{IS}$ ). Todas estas señales son almacenadas para su postprocesado. La Figura 8 muestra las formas de onda de las corrientes de compensación y en la fuente con el filtro conectado. El equipo inyecta una corriente en el punto de conexión común lo que permite obtener una corriente sinusoidal en la línea. Después de registrar las formas de onda y corriente, se puede realizar el análisis (Figura 9). Como se puede deducir de los resultados, las corrientes armónicas de la carga se han compensado y la tasa de distorsión armónica de la corriente medida es 7.86%. El espectro frecuencial de la corriente de línea contiene armónicos de orden alto debido al modulador PWM. Estos resultados pueden mejorarse si se sustituyen los inductores de enlace de corriente por filtros LCL. Bajo estas condiciones el alumno debe recalcular los parámetros de control para optimizar el comportamiento del filtro activo de potencia.

La plataforma diseñada también se emplea para realizar las pruebas que permiten una caracterización de las prestaciones dinámicas del controlador. El conmutador  $sw$  (Figura 3) se utiliza para generar variaciones bruscas de las condiciones de la carga. En la Figura 10 se muestran las formas de onda de las corrientes en el PCC. El tiempo de respuesta es de 12 ms. El estudiante debe reajustar los parámetros del controlador para conseguir un tiempo de respuesta igual de medio ciclo a la frecuencia fundamental, que corresponde a la respuesta ideal cuando se emplea el método FBD diseñado para la operación con armónicos impares.

#### V. VALORACIÓN DE LA PLATAFORMA DESARROLLADA

La plataforma desarrollada permite a los estudiantes comprobar de forma experimental los conocimientos teóricos asociados al filtrado activo de potencia, introducirse en el diseño de controladores digitales para FAPP y obtener resultados experimentales para la evaluación de los controladores. También es importante señalar que la utilización de esta plataforma supone para los estudiantes una toma de contacto con la problemática real asociada a los sistemas electrónicos de potencia industriales. Por lo tanto, se puede concluir que esta plataforma puede ser considerada como una herramienta muy útil en la enseñanza del filtrado activo de potencia.

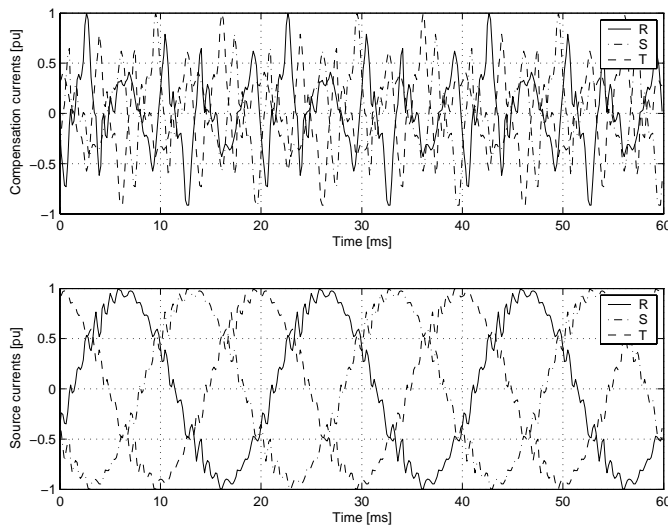


Fig. 8. a) Corrientes de compensación y b) corrientes de línea

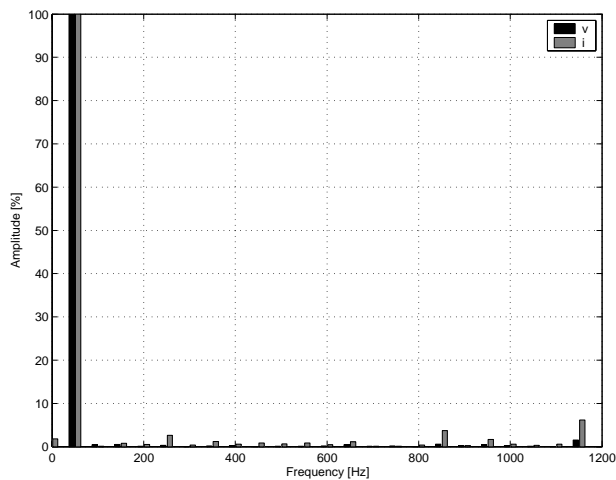


Fig. 9. Espectro de las señales de tensión y corriente en el PCC

En el caso de los alumnos de la Ingeniería Técnica Naval, la experiencia nos ha mostrado la dificultad que presenta, en general, la programación en lenguaje C al no haber cursado una materia de introducción a este lenguaje.

Por este motivo consideramos que la plataforma puede ser mejorada sustituyendo la programación en C por el desarrollo de controladores en *MatLab/Simulink* exportables directamente a tarjetas DSP compatibles, y en su caso externas. Ejemplo de este tipo de sistemas son las tarjetas de control *dSpace*, como la DS-1104, y los nuevos DSP de *Texas Instruments*, como el TMS320F2812. Asimismo, la utilización de estas nuevas tarjetas de control permitiría el desarrollo de prácticas remotas, en el sentido de no presenciales, a través de Internet. En esta línea, la GUI debería ser modificada para ejecutarse mediante navegadores web [20].

Aunque la plataforma se ha desarrollado para el estudio práctico de los FAPP, su traslación a otras prácticas de laboratorio del curso de electrónica de potencia es inmediata, realizando la implementación de las librerías específicas para cada tipo de práctica. Particularmente la plataforma puede emplearse en el diseño de las prácticas de laboratorio

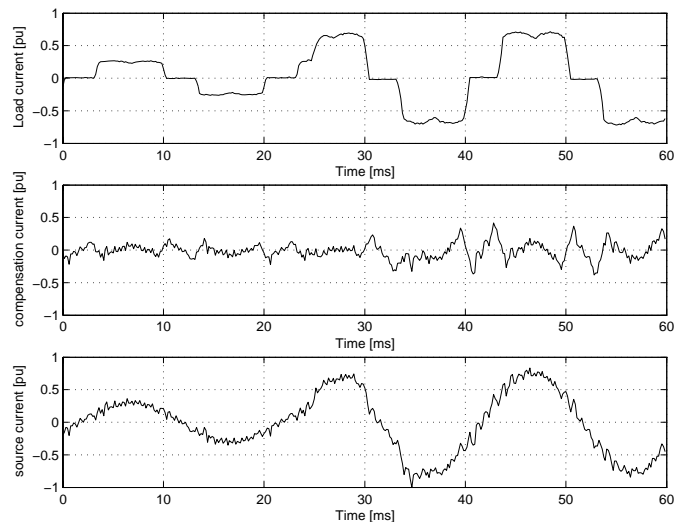


Fig. 10. a) Corriente en la carga. b) Corriente de compensación. c) Corriente de línea

correspondientes a los temas de rectificado activo (P4) y control de motores ac (P6).

## VI. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado una plataforma de laboratorio para la realización de prácticas de filtrado activo de potencia en paralelo en sistemas trifásicos a tres hilos que permite el estudio y la evaluación experimental de los diferentes tipos de controladores digitales de este tipo de equipos. La estructura de la plataforma que se presenta consta de cuatro bloques que pueden ser modificados independientemente, lo que le aporta gran versatilidad. Los estudiantes de grado y de postgrado de Ingeniería Eléctrica o Naval pueden diseñar y desarrollar sus propios controladores tomando como base las librerías software disponibles. Las señales de entrada y salida del controlador, como la corriente instantánea en la carga no lineal o la corriente de referencia para la compensación, son monitorizadas gráficamente en tiempo real, mediante una interfaz gráfica de usuario diseñada al efecto (GUI) y pueden ser registrados para su posterior procesamiento. La plataforma de laboratorio desarrollada se puede considerar como una herramienta muy útil para el estudio experimental del filtrado activo de potencia en los estudios de ingeniería.

La arquitectura modular de la plataforma diseñada, en particular su interfaz gráfica y las librerías software suministradas, permiten ampliar sus posibilidades de utilización extendiendo su uso a la docencia remota e incluyendo otras prácticas asociadas a la electrónica de potencia.

## REFERENCIAS

- [1] M. P. Kazmierkowski (ed.), R. Krishnan (ed.) and F. Blaabjerg (ed.), *Control in Power Electronics. Selected Problems*, Academic Press, Amsterdam, 2002.
- [2] A. Larsson, "Flicker emission of wind turbines during continuous operation," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 17, no. 1, pp. 114-118. March 2002.

- [3] R. C. Dugan, M. F. McGranahan and H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, McGraw-Hill, New York, 1996.
- [4] D. Rivas, L. Moran, J. W. Dixon and J. R. Spinoza, "Improving passive filter compensation performance with active techniques," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 50, no. 1, pp. 161-170. February 2003.
- [5] M. Sedighy, S. B. Dewan and F. P. Dawson, "A robust digital current control method for active power filters," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 36, no. 4, pp. 1158-1164. July/August 2000.
- [6] K. Nishida, Y. Konishi and M. Nakaoka, "Current control implementation with deadbeat algorithm for three-phase current-source active power filter," *IEE Proc. Electr. Power Appl.*, vol. 149, no. 4, pp. 275-282. July 2002.
- [7] H. Akagi, Y. Kanazawa and A. Nabae, "Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 20, no. 3, pp. 625-630. May/June 1984.
- [8] R. S. Herrera and P. Salmerón, "Instantaneous reactive power theory: A comparative evaluation of different formulations," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 1, pp. 595-604. January 2007.
- [9] B. Zhang, S. Yi and X. He, "A novel harmonic current detection technique based on a generalized dq coordinate transform for active power filter and fault protection of power system," in *Proc. 5<sup>th</sup> Int. Conf. on Advances in Power System Control, Operation and Management*, vol. 2, pp. 543-547. 30 Oct. – 1 Nov. 2000.
- [10] P. Mattavelli, "A closed loop selective harmonic compensation for active filters," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 37, no. 1, pp. 81-89. January/February 2001.
- [11] M. Depenbrock, "The FBD-method, a generally applicable tool for analyzing power relations," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 8, no. 2, pp. 381-387. May 1993.
- [12] V. M. Moreno and A. Pigazo, "Modified FBD method in active power filters to minimize the line current harmonics," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22 no. 1, pp. 735-736. January 2007.
- [13] S. Mariethoz and A. C. Rufer, "Open loop and closed loop spectral frequency active filtering," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 17, no. 4, pp. 564-573. July 2002.
- [14] S. Orts, F. J. Gimeno Sales, S. Segui Chilet, M. Alcaniz, R. Masot and A. Abellan, "New active compensator based on IEEE Std. 1459," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 4, no. 1, pp. 38-46. March 2006.
- [15] M. P. Kazmierkowski and H. Tunia, *Automatic control of converter-fed drives*, Academic Press, 1994.
- [16] M. P. Kazmierkowski, R. Krishnan and F. Blaabjerg, *Control in power electronics. Selected problems*, Academic Press, 2002.
- [17] M. Liserre, R. Teodorescu and F. Blaabjerg, "Multiple harmonics control for three-phase grid converter systems with the use of PI-RES current controller in a rotating frame," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21, no. 3, pp. 836-841. May 2006.
- [18] P. Lezana, C. A. Silva, J. Rodríguez and M. A. Pérez, "Zero-steady-state-error input-current controller for regenerative multilevel converters based on single-phase cells," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 2, pp. 733-740. April 2007.
- [19] D. G. Holmes and T.A Lipo, *Pulse Width Modulation for Power Converters. Principles and Practices*, IEEE Press, 2003.
- [20] W. G. Hurley and C. K. Lee, "Development, implementation, and assessment of a web-based power electronics laboratory," *IEEE Transactions on Education*, vol. 48, no. 4, pp. 567 – 573, November 2005.



**Víctor M. Moreno Sáiz** (M'01) es Licenciado en Ciencias Físicas (Especialidad Electrónica) (1980) y se doctoró en 1994 por la Universidad de Cantabria (España). Su tesis doctoral, "Sistema distribuido para la medida y análisis de la calidad de la energía eléctrica aplicando filtrado de Kalman" obtuvo el premio Viesgo en 1994. Víctor M. Moreno es Profesor Titular de Universidad del Departamento de Electrónica y Computadores de la Universidad de Cantabria. Las líneas de investigación en las que trabaja en la actualidad son la calidad de la energía eléctrica,

compatibilidad electromagnética (EMC), el procesado digital de señales y controladores digitales de convertidores de potencia. Es miembro de la sociedad de Electrónica de Potencia de IEEE (PES).



**Alberto Pigazo López** (M'05) es Licenciado en Ciencias Físicas (Especialidad Electrónica) (1997) y se doctoró en 2004 por la Universidad de Cantabria (España). En 2004, trabajó como investigador en el Laboratorio de Electrónica de Potencia del Politécnico de Bari (Italia). Actualmente es Profesor Asociado en el Departamento de Electrónica y Computadores de la Universidad de Cantabria. Las líneas de investigación en las que trabaja son la calidad de la energía eléctrica, compatibilidad electromagnética (EMC), el procesado digital de señales y controladores de convertidores de

potencia. Es miembro de la sociedad de Electrónica Industrial de IEEE (IES) y colabora como revisor en conferencias y revistas de las sociedades de IEEE.