

# Diseño de sistema reconfigurable para la síntesis de perturbaciones eléctricas basado en FPGA

## ***Claudia Gutiérrez Torres***

Maestría en Mecatrónica, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Moctezuma 249,  
Col. San Cayetano, San Juan del Río, Querétaro, México, (427) 1921200  
*mina\_park@live.com*

## ***René de Jesús Romero Troncoso***

DICIS, Universidad de Guanajuato, Carr. Salamanca-Valle km.3.5+1.8, Comunidad de Palo Blanco,  
Salamanca, Guanajuato, México, (464) 6479940  
*troncoso@hspdigital.org*

## ***Roque Alfredo Osornio Rios***

HSPDigital-CA Mecatrónica, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Moctezuma  
249, Col. San Cayetano, San Juan del Río, Querétaro, México, (427) 1921200  
*raosornio@hspdigital.org*

## ***Luis Morales Velázquez***

HSPDigital-CA Mecatrónica, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Moctezuma  
249, Col. San Cayetano, San Juan del Río, Querétaro, México, (427) 1921200  
*lmorales@hspdigital.org*

## ***David Granados Lieberman***

Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, Carr. Irapuato-Silao Km 12.5,  
Irapuato, Guanajuato, México, (462) 6067900  
*dgranados@hspdigital.org*

## **Resumen**

Este trabajo describe el diseño e implementación de un sistema software-hardware para la emulación de perturbaciones eléctricas a través de la síntesis digital de señales, conformado por una interfaz gráfica de usuario desarrollada en Matlab (para introducción de parámetros específicos por tipo de disturbio y su previsualización), y una estructura hardware basada en un FPGA (para su síntesis y conversión a señales físicas de voltaje). El sistema está diseñado para sintetizar las componentes de tiempo-frecuencia correspondientes a diferentes disturbios eléctricos: transitorio oscilatorio, SAG, SWELL, armónicos, fluctuaciones de voltaje y notching. La estructura del sistema permite que éste pueda ser reconfigurado para sintetizar otro tipo de señales eléctricas de interés. Se evalúa la efectividad del sistema implementando en tarjetas de desarrollo propio, mediante la validación de las formas de onda resultantes, de acuerdo a los parámetros definidos para cada uno de los disturbios generados.

**Palabras Claves:** FPGA, VHDL, síntesis de señales, disturbios eléctricos.

## 1. Introducción

Las empresas de generación de energía eléctrica, así como los usuarios finales están cada vez más preocupados por la calidad de la misma. El término calidad de la energía se ha vuelto palabras de moda en la industria de la energía desde finales de los ochentas; siendo éste un concepto genérico para una multitud de tipos individuales de disturbios en el sistema eléctrico. Las razones del incremento en el interés en este tema son diversas, pero la preocupación común es debido al constante incremento de la productividad y revitalización de la industria con equipo moderno y de automatización; este equipo es, comúnmente, el más vulnerable ante los disturbios de energía y, la mayoría de las veces, una fuente de perturbaciones en el sistema eléctrico. Con procesos completamente automatizados, la operación eficiente de las máquinas y sus controles se vuelven cada vez más dependientes de la calidad de la energía, la cual, generalmente se refiere a mantener una forma de onda de voltaje sinusoidal a una frecuencia y magnitud específicas, cualquier desviación es considerada un disturbio [1, 2]. Estos disturbios pueden causar sobrecalentamiento de transformadores y cables, además de mal

funcionamiento de computadoras, controladores lógicos programables y otros dispositivos sensibles a estas variaciones y que son ampliamente usados en la industria [3, 4], así, la razón esencial de la preocupación por la calidad de la energía es el valor económico; la interrupción de un proceso en una empresa, por ejemplo, puede resultar en costosas consecuencias debido a las pérdidas en la producción. Entonces, es necesario contar con la emulación de disturbios eléctricos que auxilien el análisis de éstos para entender el comportamiento del sistema de potencia y sus efectos en el equipo, y así, identificar e implementar medidas de mitigación efectivas.

Para la obtención de estas formas de onda, se pueden identificar cuatro posibilidades. La primera, monitorear la línea en espera de que los disturbios se den de forma natural, aunque sólo algunos tipos de estas señales pueden ser obtenidas, así que es muy difícil obtener un rango amplio de éstas [5]. La segunda opción es obtener un modelo del sistema de fallas y simularlo, como en [6] en donde se modela, mediante la herramienta Simulink de Matlab, el sistema de generación alimentando dos líneas de transmisión y se aplican condiciones que provocan dos tipos de disturbios. Estas implementaciones software, cumplen la función de proporcionar señales eléctricas de interés, sin embargo, el número de éstas es limitado y se requiere modificar el modelo de simulación para obtener otras. Asimismo, existe la opción de recrear las condiciones que generan las diversas perturbaciones en el sistema eléctrico, por ejemplo la creación de SAGs a través del arranque de grandes motores [7], en la cual no se tiene condiciones controladas para la generación de los disturbios, además de ser una opción muy costosa por las potencias que se requieren tanto de los equipos como de la instalación. La cuarta posibilidad es generar formas de onda de manera sintética y aplicarlas a la línea de alimentación. Para la síntesis de señales, una opción es recurrir a modelos matemáticos; como en [8, 9] donde el uso de Matlab, permite la simulación de señales que incluyen la forma de onda de la línea (fundamental) más seis y ocho tipos de disturbios eléctricos respectivamente. A pesar de que estas últimas opciones dejan atrás la limitante del número de disturbios (sólo es necesario conocer el modelo matemático para generarlos), aún conservan la característica de ser ambientes puramente simulados. Cuando una emulación del sistema en condiciones reales es requerida, surge la necesidad de contar con sistemas

capaces de generar formas de onda analógicas que lo hagan posible. Las alternativas comerciales, como las fuentes de voltaje AC programables, son utilizadas para conocer la susceptibilidad del equipo a eventos de calidad de la energía, debido a que son capaces de emularlos, generando sus formas de onda de voltaje (fundamental y disturbio), además de formas de onda arbitrarias. Sin embargo en algunos de estos generadores, el rango de frecuencia de salida es limitado [10, 11]; y más aún, conforme el requerimiento del rango de potencia se incrementa, el costo de este equipo se eleva considerablemente [12, 13].

En este trabajo, se propone la creación de un sistema software-hardware que permita la síntesis de señales eléctricas que, una vez generadas en software, puedan ser inyectadas en la línea de alimentación comercial y así emular los disturbios de la calidad de la energía. Se desarrolla en Matlab una interfaz gráfica de usuario (GUI) encargada de recibir los parámetros de las formas de onda, generar los datos correspondientes a éstas y mostrar una previsualización de las mismas (simulación). Además, el sistema cuenta con una arquitectura digital basada en un arreglo de compuertas programables en campo (FPGA), conformada por estructuras digitales (controladores de DAC, memoria RAM estática y USB, y un sintetizador de señales) que son propiedad intelectual de la Universidad Autónoma de Querétaro, y que tienen la función de almacenamiento y lectura de las señales, y su síntesis de acuerdo a las especificaciones de amplitud, frecuencia y tiempo. Ambos módulos (software y hardware) están interconectados mediante el protocolo de comunicación serial USB. Por su estructura, el sistema tiene las características de reconfigurabilidad y fácil integración con otros sistemas. Para la validación del mismo, se analiza la efectividad en la síntesis de las señales requeridas para la emulación de los disturbios: transitorio oscilatorio, SAG, SWELL, armónicos, fluctuaciones y notching, mediante la comprobación de forma de onda y los parámetros de amplitud, tiempo y frecuencia.

## **2. Desarrollo del sistema propuesto**

De acuerdo a las características mencionadas en la sección anterior, el diagrama general del sistema propuesto se muestra en la Fig. 1. Cuenta con un módulo software encargado

de generar, mediante modelos matemáticos, las señales y enviarlas al módulo hardware, donde son almacenadas y posteriormente enviadas a un convertidor analógico digital, para su conversión a formas de onda de voltaje.

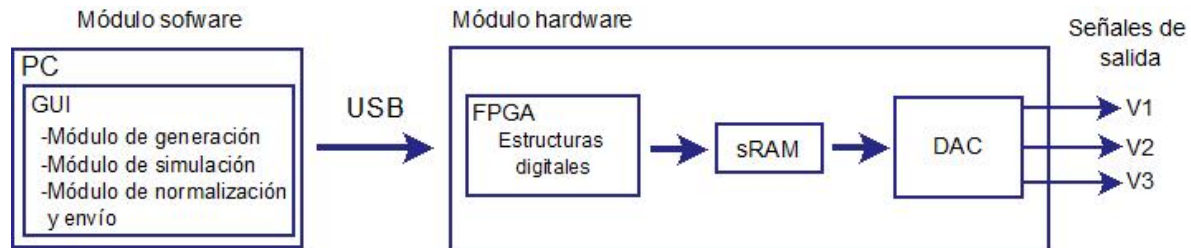


Fig. 1. Diagrama general del sistema.

## A. Módulo software

Se trata de una interfaz gráfica de usuario desarrollada en MATLAB, la cual permite al sistema contar con una interacción amigable con el usuario. Consta de tres módulos principales:

- 1) Módulo de generación: Encargado de la validación de los parámetros de entrada y la generación de los datos de las formas de onda deseadas (sólo disturbios), de acuerdo a sus modelos matemáticos, los cuales se muestran en la Tabla 1. El término en azul corresponde a la forma de onda fundamental ideal de la línea eléctrica y el resto de los términos al disturbio o perturbación, y en donde:

$A_n, A_i$  = *amplitud fundamental, amplitud del disturbio*

$f_o, f_i$  = *frecuencia fundamental, frecuencia del disturbio*

$t_1, t_2$  = *tiempo de inicio, tiempo de fin*

$a$  = *factor de amortiguamiento*

$h$  = *número de armónico*

$\varphi_i, \varphi_h = \text{fase del disturbio, fase del armónico}$

**Tabla 1. Modelos matemáticos de los disturbios.**

Disturbio	Modelo matemático
Transitorio oscilatorio	$v(t) = A_n \cos(2\pi f_o t) + A_i \cos(2\pi f_i t + \varphi_i) e^{-\alpha t}$
SAG	$v(t) = A_n \cos(2\pi f_o t) - A_i [u(t - t_1) - u(t - t_2)] \cos(2\pi f_o t)$
SWELL	$v(t) = A_n \cos(2\pi f_o t) + A_i [u(t - t_1) - u(t - t_2)] \cos(2\pi f_o t)$
Armónicos	$v(t) = A_n \cos(2\pi f_o t) + \sum_{h=2}^H A_h \cos(2\pi h f_o t - \varphi_h)$
Fluctuaciones	$v(t) = A_n \cos(2\pi f_o t) + 0.5A_i \cos[2\pi(f_o + f_i)t + \varphi_i] + 0.5A_i \cos[2\pi(f_o - f_i)t + \varphi_i]$
Notching	$v(t) = A_n \cos(2\pi f_o t) + A_i [ \cos(2\pi f_i t) ]$

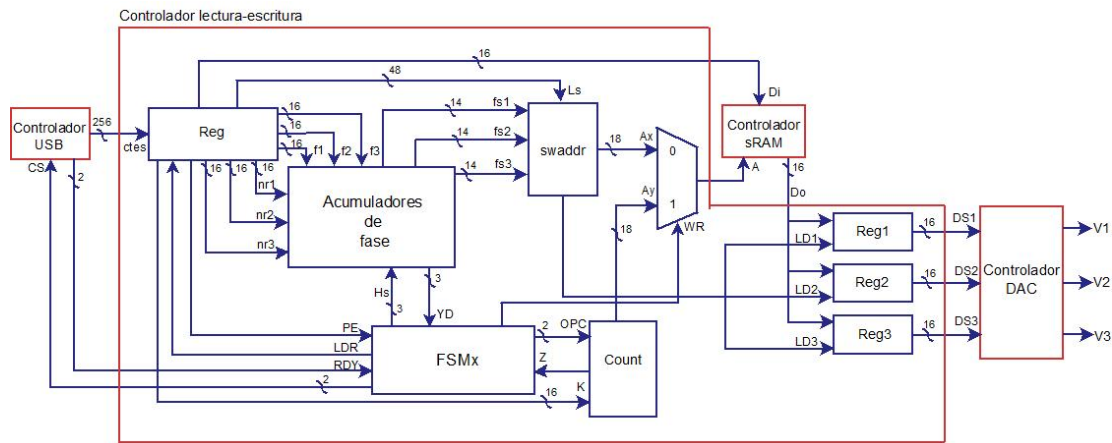
- 2) Módulo de simulación: Cumple la función de mostrar una vista previa de las señales a generar y de la forma de onda final si éstas fuesen inyectadas en la línea de alimentación comercial o señal fundamental.
- 3) Módulo de normalización y envío: Calcula las constantes requeridas por la estructura digital, normaliza los datos a niveles adecuados para el DAC y realiza el envío por USB de la información hacia el módulo hardware.

## B. Módulo hardware

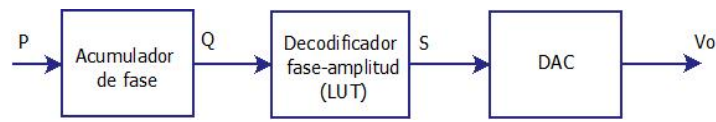
Corresponde a los dispositivos requeridos para la salida analógica de las formas de onda generadas en el módulo anterior. Lo conforman tres elementos principales:

- 1) Arreglo de compuertas programables en campo (FPGA): Contiene las estructuras digitales requeridas por el sistema y desarrolladas en VHSIC Hardware Description Language (VHDL), las cuales incluyen: controladores para memoria RAM, DAC y USB, además del control principal del sistema y estructuras auxiliares (ver Fig. 2). El control principal se encarga de la recepción de datos por el módulo USB, los almacena en la memoria RAM estática y cuando se han recibido las 3 señales (salida analógica por 3 canales), pasa a modo lectura.

El sintetizador digital de formas de onda está basado en la técnica de Síntesis Digital Directa, la cual permite emular por medios digitales una señal analógica, además de poder controlar su frecuencia, amplitud, simetría y modulación. Esta técnica se basa en una tabla, que guarda una secuencia de valores (instantáneos y equidistantes) de la forma de onda deseada, y un reloj de frecuencia fija que establece la cadencia de lectura de dichos valores [14]. El esquema básico de esta estructura (ver Fig. 3) consta de un acumulador de fase, que determina cuál de las muestras instantáneas almacenadas se va a leer, un decodificador fase-amplitud que obtiene el valor correspondiente y un convertidor digital-analógico [15].



**Fig. 2. Estructura digital del sistema.**



**Fig. 3. Esquema básico de un sintetizador de formas de onda.**

- 2) Memoria RAM estática (sRAM): Controlada mediante hardware (módulo digital), es utilizada para almacenar la información de las formas de onda que se desean generar.
- 3) Convertidor Digital-Analógico (DAC): Contando también con un módulo digital para su manejo, es el dispositivo que permite trasladar los datos digitales de 16 bits en señales analógicas en el rango de -10V a 10V.

### **3. Experimentación y resultados**

#### **A. Implementación y casos de estudio**

La Fig. 4 muestra el banco de pruebas de la implementación de este sistema, con los componentes físicos requeridos: Una PC con la interfaz gráfica de usuario, la tarjeta PLC-UAQ de desarrollo propio para la implementación de las estructuras digitales y un osciloscopio Tektronix TDS 2022B para la obtención de las señales.

Para evaluar la efectividad del sistema, a continuación se plantean 6 casos de estudio, correspondientes a cada una de las formas de onda disponibles (hasta el momento) en el menú de la interfaz gráfica de usuario. Para efectos de simulación se tomó como frecuencia y amplitud fundamentales 60 Hz y 10V, respectivamente (ver Tabla 2).





Fig. 4. Banco de pruebas del sistema.

Tabla 2. Casos de estudio.

Caso de estudio	Modelo matemático	Parámetros de prueba
Transitorio oscilatorio	$f(t) = A_i \cos(2\pi f_i t + \varphi) e^{-\alpha t}$	$A_i = 2V, f_i = 10Hz, \varphi = 0,$ $\alpha = 2.5, t_1 = 0.05s, t_2 = 0.25s$
SAG	$f(t) = -A_i [u(t - t_1) - u(t - t_2)] \cos(2\pi f_o t)$	$A_i = 4V, t_1 = 0.05s, t_2 = 0.25s$
SWELL	$f(t) = A_i [u(t - t_1) - u(t - t_2)] \cos(2\pi f_o t)$	$A_i = 4V, t_1 = 0.1s, t_2 = 0.2s$
Armónicos	$f(t) = \sum_{h=2}^H A_h \cos(2\pi h f_o t - \varphi_h)$	$H = 3, A_2 = 2V, A_3 = 4V,$ $\varphi_2 = 0 \text{ rad}, \varphi_3 = \pi/8$
Fluctuaciones	$f(t) = 0.5A_i \cos[2\pi(f_o + f_i)t + \varphi_i]$ $+ 0.5A_i \cos[2\pi(f_o - f_i)t + \varphi_i]$	$A_i = 2V, f_i = 5Hz, \varphi_i = 0$
Notching	$f(t) = A_i [ \cos(2\pi f_i t) ]$	$A_i = 3V, f_i = 35Hz$

## B. Resultados

- 1) Interfaz gráfica de usuario: Contiene los controles para la captura de los parámetros de las formas de onda, la visualización de la simulación (gráficas), la carga de las señales en cada canal analógico, y el envío de datos al módulo hardware (Fig. 5), además del menú de las formas de onda disponibles (Fig. 6).

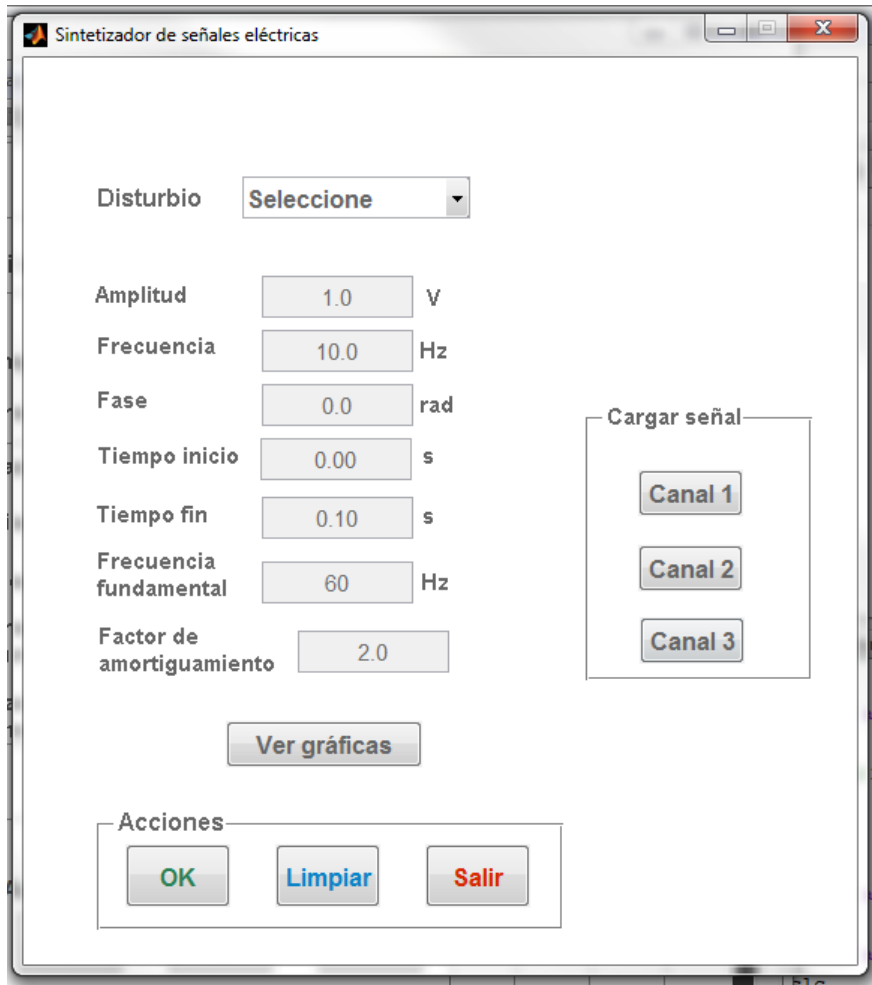


Fig. 5. Interfaz gráfica de usuario.

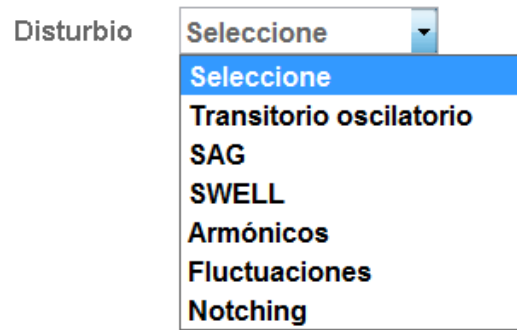


Fig. 6. Menú de formas de onda disponibles.

- 2) Implementación de módulos digitales: Se llevó a cabo utilizando la tarjeta PLC-UAQ (ver Fig. 7), propietaria del grupo de investigación HSP-Digital de la Universidad Autónoma de Querétaro, la cual es un sistema basado en un FPGA de bajo costo y alta capacidad; contiene el cerebro del sistema (FPGA) además, convertidores analógico-digital (ADC) y digital-analógico (DAC) de 16 bits y memorias RAM. La tarjeta puede comunicarse con una PC a través de la interfaces RS232 y USB.

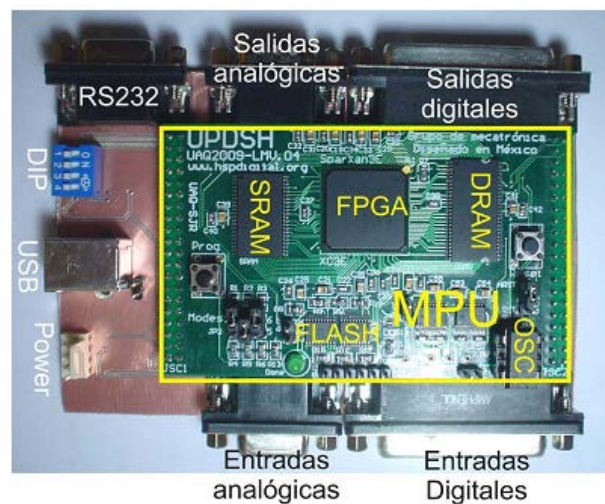
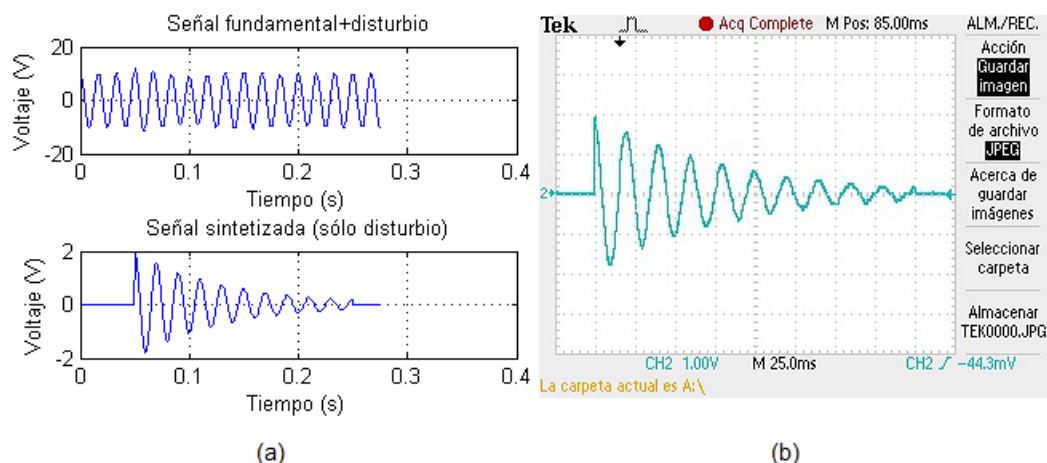


Fig. 7. Tarjeta PLC-UAQ.

3) Casos de estudio: A continuación se presentan las formas de onda obtenidas, en simulación en software primeramente y la forma de onda generada físicamente (analógica).

3.1 Transitorio oscilatorio: La Fig. 8-(a) muestra la etapa de simulación del transitorio oscilatorio, en la gráfica superior la forma de onda fundamental con el disturbio integrado y en la inferior, la señal a sintetizar por el sistema, correspondiente sólo al disturbio. Para este caso de estudio, el disturbio comienza en  $t= 0.05s$  y termina en  $t=0.25 s$ , una forma de onda sinusoidal amortiguada es generada como una señal de voltaje por el sistema (ver Fig. 8-(b)) con una duración de 0.2 s correspondiente con la simulación.



**Fig. 8. Transitorio oscilatorio: (a) Simulación, (b) Señal física analógica.**

3.2 SAG: La Fig. 9-(a) muestra la simulación (superior: línea con disturbio, inferior: sólo disturbio) de un SAG que comienza en  $t=0.05s$  y termina en  $t=0.025$ , lo cual es congruente con la señal de voltaje de 0.2s generada por el sistema, mostrada en la Fig. 9-(b).

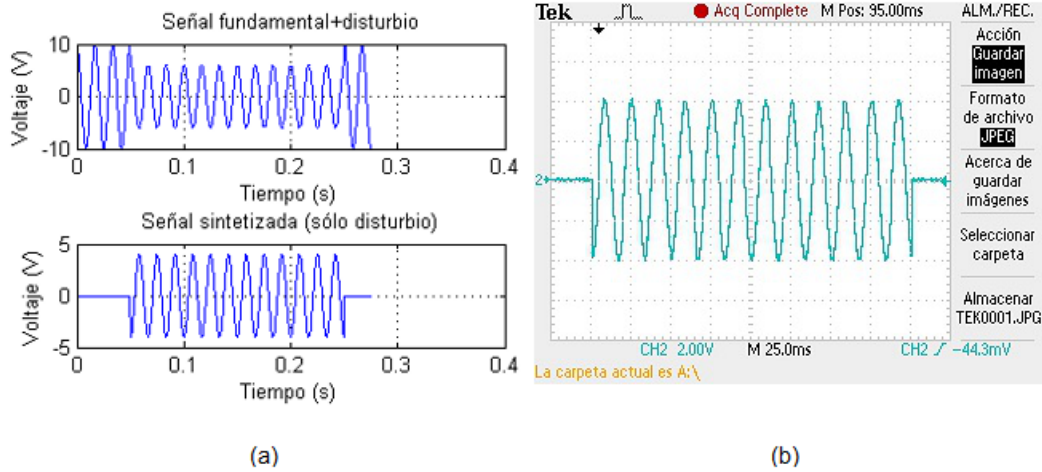


Fig. 9. SAG: (a) Simulación, (b) Señal física analógica.

3.3 SWELL: La simulación de este disturbio (ver Fig.10-(a)) es mostrada en dos casos: línea con disturbio en la figura superior y sólo disturbio en la línea inferior; un SWELL que inicia en  $t=0.1$  y termina en  $t=0.2$ , implica una señal de duración 0.1 s, correspondiente a la generada por el sistema (ver Fig. 10-(b)).

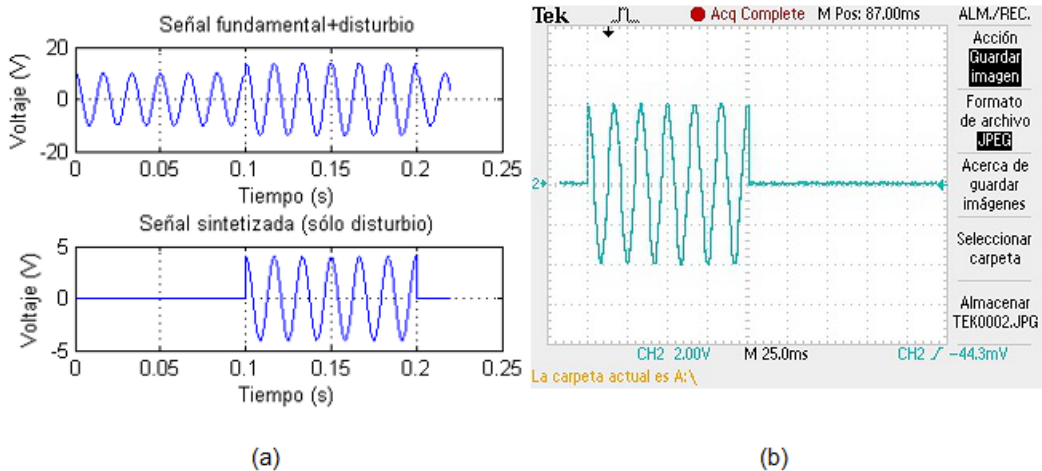
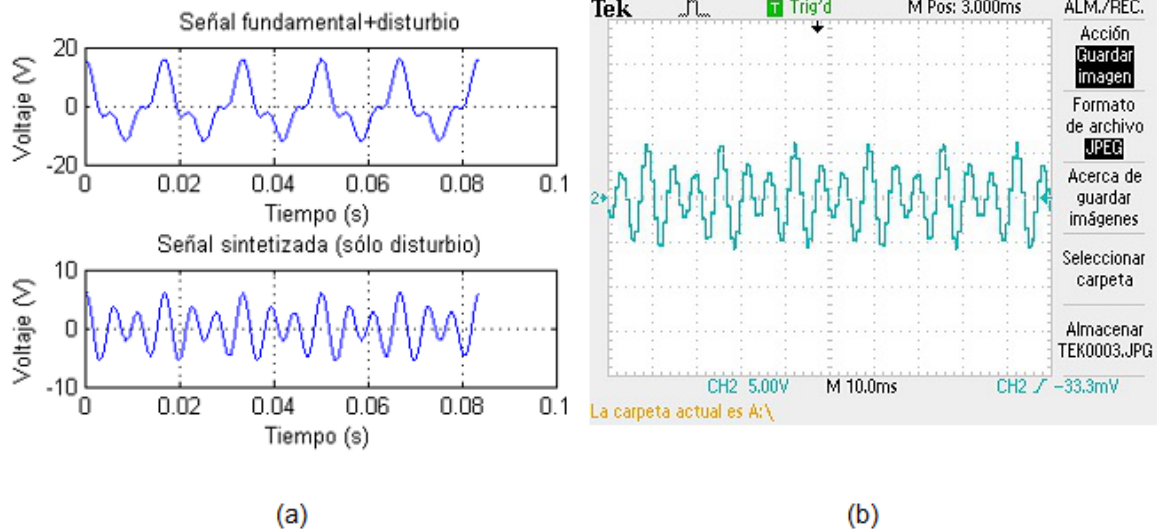


Fig. 10. SWELL: (a) Simulación, (b) Señal física analógica.

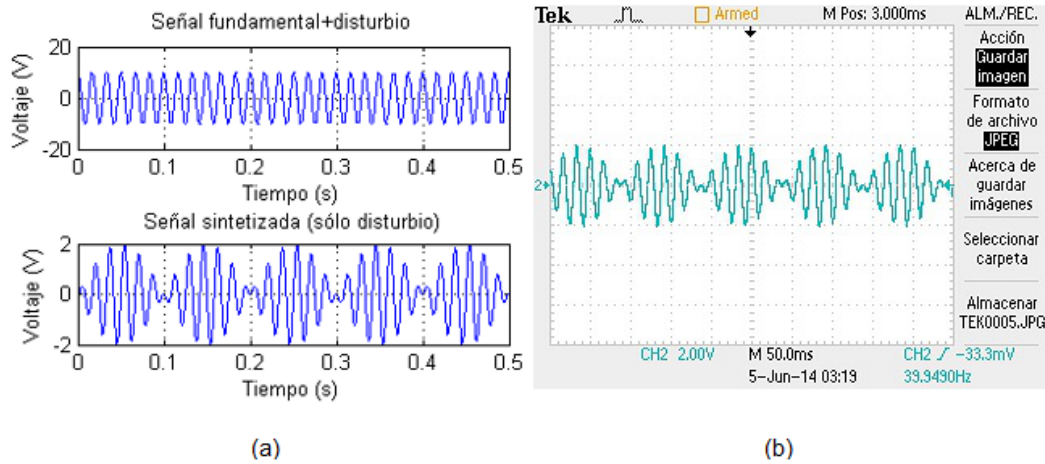
3.4 Armónicos: La simulación de este disturbio periódico es mostrada en la Fig. 11-(a) (gráfica superior: línea con disturbio, inferior: sólo disturbio).



**Fig. 11. Armónicos: (a) Simulación, (b) Señal física analógica.**

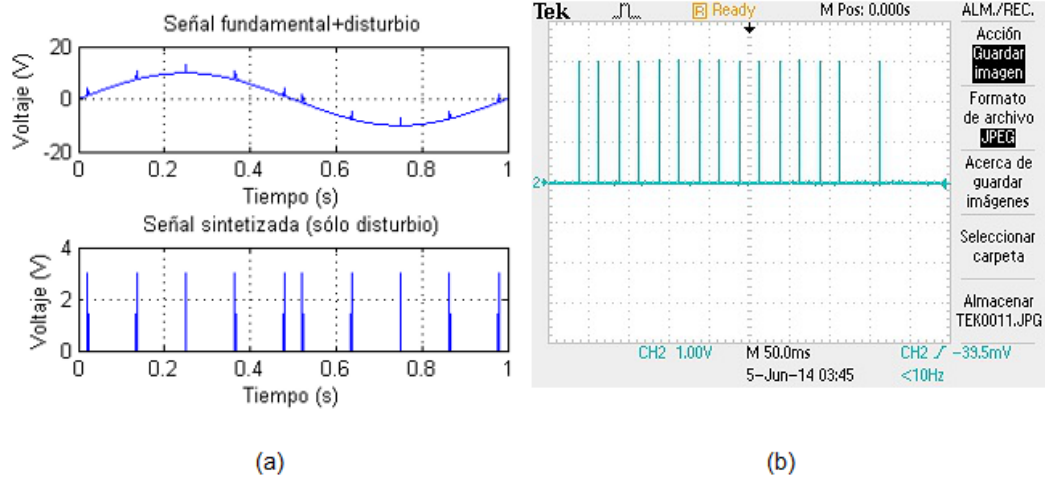
La Fig. 11-(b) muestra el segundo y tercer armónico de la señal fundamental que son generados por el sistema como forma de onda de voltaje.

3.5 Fluctuaciones: Este disturbio es mostrado en simulación en la Fig. 12-(a), primeramente como la señal de la línea con el disturbio (superior) y posteriormente sólo la forma de onda el disturbio (inferior), siendo ésta última la generada por el sistema como señal de voltaje (ver Fig. 12-(b)).



**Fig. 12. Fluctuaciones: (a) Simulación, (b) Señal física analógica.**

3.6 Notching: En las gráficas superior e inferior de la Fig. 13-(a), respectivamente, se muestran la señal de la línea con este disturbio y la forma de onda del disturbio solamente. Ésta última corresponde a la forma de onda física analógica proporcionada por el sistema (ver Fig.13-(b)).



**Fig. 13. Notching: (a) Simulación, (b) Señal física analógica.**



4) Recursos utilizados: El FPGA utilizado es un Spartan 3E XC3S500E de Xilinx, el reporte de la síntesis de los módulos implementados (ver Fig. 14) proporciona la información referente a los recursos disponibles en el dispositivo (segunda columna), los que han sido utilizados por la implementación (tercera columna) y los respectivos porcentajes de utilización (cuarta columna). Éstos últimos muestran que la implementación no es demasiado demandante en cuanto a recursos se refiere, lo cual implica que módulos adicionales pueden ser agregados al sistema y éste puede ser implementado en el mismo dispositivo.

Device Utilization Summary				
Logic Utilization	Used	Available	Utilization	Note(s)
Number of Slice Flip Flops	1,250	9,312	13%	
Number of 4 input LUTs	2,089	9,312	22%	
Number of occupied Slices	1,476	4,656	31%	
Number of Slices containing only related logic	1,476	1,476	100%	
Number of Slices containing unrelated logic	0	1,476	0%	
Total Number of 4 input LUTs	2,224	9,312	23%	
Number used as logic	2,089			
Number used as a route-thru	135			
Number of bonded IOBs	44	232	18%	
Number of BUFGMUXs	1	24	4%	
Number of MULT18X18SIOs	12	20	60%	
Average Fanout of Non-Clock Nets	2.95			

Fig. 14. Utilización de recursos en el dispositivo.

## 4. Discusión

Las formas de onda obtenidas a nivel analógico corresponden a las generadas en la simulación. El empleo de modelos matemáticos permite darle gran versatilidad al sistema de generación dado que se puede incrementar el número de señales que éste puede generar, solamente conociendo el modelo matemático de las formas de onda en cuestión



y resulta sencillo incorporarlo al software sin modificar su diseño funcional. Asimismo, la estructura hardware es completamente reconfigurable y su estructura puede ser fácilmente modificada para ser incorporada con otros sistemas. Así, el sistema es capaz de generar señales eléctricas a nivel analógico que, de ser inyectadas en la línea de alimentación comercial, permitirían la emulación de diversos disturbios de la calidad de la energía, y a diferencia de los equipos comerciales, aprovecharía la potencia ya disponible en la red eléctrica.

## **5. Conclusiones**

Este trabajo presenta el diseño de un sistema software-hardware que permitiera la síntesis de señales eléctricas en el dominio analógico; el sistema propuesto cuenta con una GUI amigable con el usuario y que permite una simulación de las señales que se desean sintetizar. El módulo hardware está basado en un FPGA, dispositivos que permiten el procesamiento a grandes velocidades y el uso de diseños reconfigurables, lo cual le brinda al sistema una gran versatilidad para su integración con otros sistemas y la capacidad de integrar cualquier otro tipo de formas de onda de interés.

Para esta implementación se sintetizaron en particular señales que son importantes en el tema de la calidad de la energía. Los resultados muestran que el sistema es capaz de sintetizar las señales revisadas en los casos de estudio y se verifica que los parámetros especificados para la síntesis de las señales corresponden a los obtenidos físicamente en las señales analógicas de voltaje.

Diversas prospectivas para el trabajo aquí reportado consisten en la adición de los módulos necesarios para lograr la inyección de las formas de onda en la línea eléctrica de alimentación comercial y darle al sistema la capacidad de emular disturbios eléctricos con la potencia necesaria para su aplicación con cargas eléctricas reales.

## 6. Referencias

- [1] R.C. Dugan, M.E. McGranhan, *Electrical Power Systems Quality*. Segunda Edición. 2002. McGraw-Hill. Páginas: 1-6.
- [2] M. Bollen, I. Gu, *Signal Processing of power quality disturbances*. Primera Edición. 2006. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey. Páginas: 5-7.
- [3] G. Brodzinski, A. Majkowski, R.J. Rak, "Simulations and analysis of disturbances in power systems". *Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*. Mayo 1-3, 2007. Páginas: 1-4.
- [4] M. Sushama, G.T.R. Das, A.J. Jaya, K. Chandana, "Clasificación de Power Signal Disturbances Using Wavelet Based Neural Network". *International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference*. Octubre 12-15, 2008. Páginas: 1-5.
- [5] Z. Hongzhi, Y. Xiaodong, "Disturbance Classification Utilizing Wavelet and Multi-class Support Vector Machines". *Fourth International Conference on Natural Computation*. Octubre 18-20. 2008. Páginas: 170-174.
- [6] R. Madhusudan, G.R. Rao, "Modeling and Simulation of a Dynamic Voltage Restorer (DVR) for Power Quality Problems Voltage Sags and Swells". *International Conference On Advances in Engineering, Science and Management*. Marzo 30-31, 2012. Páginas: 442-447.
- [7] J.C. Gomez, C. Reineri, G. Campetelli, M.M. Morcos, "A study of Voltage Sags Generated by Induction Motor Starting". *Electric Power Components and Systems*. Vol. 32. No. 6. Junio 2010. Páginas: 645-653.
- [8] N. T. Huang, Y. J. Zhang, D.G. Xu, "Power Quality Disturbances Classification by Ensemble and Hybrid Neural Networks". *2010 International Conference on Power System Technology*. Octubre 24-28, 2010. Páginas: 1-7.

- [9] F. Zhao, R. Yang, "Power-Quality Disturbance Recongnition Using S-Transform". IEEE Transactions on Power Delivery. Vol 22. No.2. Abril 2007. Páginas: 944-950.
- [10] California Instruments Ls-Lx Series. [http://www.elgar.com/products/Ls-Lx/Ls-Lx\\_Series\\_Overview.htm](http://www.elgar.com/products/Ls-Lx/Ls-Lx_Series_Overview.htm). Septiembre, 2014.
- [11] AC Power Sources. <http://www.aspowertechnologies.com/products/Default.aspx>. Septiembre, 2014.
- [12] Industrial Power Corruptor. <http://www.powerstandards.com/IPC.php>. Septiembre, 2014.
- [13] H.S. Kim, J.H. Jung, E.C. Nho, I.D. Kim, T.W. Chun, H.G. Kim, "Power Quality Disturbance Generator Suitable for High Power Applications". 2013 International Conference on Electrical Machines and Systems. Octubre 26-29, 2013. Páginas 1869-1872.
- [14] R. de J. Romero Troncoso, *Electrónica Digital y Lógica Programable*. Primera Edición. 2007. Ed. Universidad de Guanajuato. Guanajuato. Páginas: 520-521.
- [15] R. Pallàs Areny, *Instrumentos Electrónicos Básicos*. 2006. Marcombo. Páginas: 154-156.

## **7. Autores**

Ing. Claudia Gutiérrez Torres recibió el título de Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica por la Universidad de Guanajuato. Actualmente se encuentra realizando una Maestría en Ciencias en Mecatrónica en la Universidad Autónoma de Querétaro.

Dr. René de Jesús Romero Troncoso obtuvo el título de Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica y el grado de Maestro por parte de la Universidad de Guanajuato y su grado de Doctor de la Universidad Autónoma de Querétaro con honores en 2004. Actualmente es profesor en FIMEE y forma parte del Sistema Nacional de Investigadores.

Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos recibió el título de Ingeniero en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Querétaro, y el grado de Maestro en Ciencias y Doctor en Ingeniería por la Universidad Autónoma de Querétaro. Forma parte del Sistema Nacional de Investigadores. Actualmente es profesor de tiempo completo en la Universidad Autónoma de Querétaro.

Dr. Luis Morales Velázquez es Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica egresado de la Universidad de Guanajuato. Obtuvo el grado de Maestría en Instrumentación y Control además de un Doctorado en la Universidad Autónoma de Querétaro. Es reconocido por CONACYT como investigador.

Dr. David Granados Lieberman obtuvo su título de Doctorado en Ingeniería con honores en la Universidad Autónoma de Querétaro. Actualmente es profesor e investigador en el Instituto Tecnológico Superior de Irapuato en la Maestría en Ingeniería Eléctrica.