



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de ingeniería

Sistema de generación y monitoreo de disturbios eléctricos

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en Ciencias (Mecatrónica)

Presenta

Claudia Gutiérrez Torres

Dirigido por:

Dr. René de Jesús Romero Troncoso

Santiago de Querétaro, Qro, México, Octubre 2014



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias (Mecatrónica)

Sistema de generación y monitoreo de disturbios eléctricos

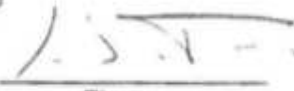
Opción de titulación
Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en Ciencias (Mecatrónica)

Presenta:
Ing. Claudia Gutiérrez Torres

Dirigido por:
Dr. René de Jesús Romero Troncoso

Dr. René de Jesús Romero Troncoso
Presidente


Firma

Dr. Roque Alfredo Osornio Rios
Secretario


Firma

Dr. Arturo García Pérez
Vocal



Firma

Dr. Luis Morales Velázquez
Suplente


Firma

Dr. David Granados Lieberman
Suplente


Firma


Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad

Dr. Inneo Torres Pacheco
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Octubre 2014

RESUMEN

Este trabajo presenta el diseño, desarrollo e implementación de un Sistema de generación y monitoreo de disturbios eléctricos, mediante su inyección a la línea de alimentación comercial y la adquisición de las señales generadas. El sistema está compuesto de un módulo para generación de disturbios y un módulo de monitoreo. El primero, consta de una etapa de síntesis de señales (para la generación de los datos correspondientes a las formas de onda de las perturbaciones) y una etapa de inyección (para incorporación de disturbios a la línea). El segundo módulo realiza el monitoreo mediante la adquisición de señales de corriente y voltaje en una carga de prueba. El sistema cuenta con una interfaz gráfica la cual obtiene los parámetros de los disturbios y genera los datos necesarios, mismos que son enviados al módulo de síntesis, cuyas funciones son realizadas por una tarjeta de diseño propio PLC-UAQ. Los disturbios son generados empleando la técnica de Síntesis Digital Directa, la cual es realizada por un Arreglo de Compuertas Lógicas Programables en Campo (FPGA), mismo que, una vez que los datos han sido recibidos y almacenados en memoria RAM, establece la cadencia de lectura de éstos, basada en una señal de cruce por cero para su sincronización con la señal de frecuencia fundamental. Las señales de voltaje a la salida de la PLC-UAQ son elevadas en magnitud por un amplificador de audio y su salida es enviada a un transformador serie, el cual las inyecta en tres fases de la línea de alimentación. El monitoreo se realiza mediante un módulo de adquisición conformado por la tarjeta PLC-UAQ y una etapa de acondicionamiento de señales; con lo cual se obtienen formas de onda de voltaje. Los resultados muestran que el sistema es capaz de generar los disturbios: transitorio oscilatorio, SAG, SWELL, fluctuaciones, armónicos y notching en un motor trifásico de 1 hp usado como carga de prueba.

(Palabras clave: DDS, FPGA, disturbios, inyección, serie)

SUMMARY

This work introduces the design, development and implementation of a System of generation and monitoring of electrical disturbances, through their series injection to the grid and the acquisition of generated signals. The system is composed by a module of generation and a module of monitoring. The first one, consists on a signal synthesis stage (for data generation corresponding to waveform of perturbations) and another stage of injection (to get them through the grid). The second one performs the monitoring by means of acquisition current and voltage signals on a test charge. The system has a User Graphic Interface which obtains the parameters of disturbances and generates necessary data, and sends them to the synthesis module, whose functions are performed by a proprietary board PLC-UAQ. The disturbances are generated by means of Direct Digital Synthesis, which is performed by a Field Programmable Gate Array (FPGA). When the data has been received and stored on the RAM memory, the FPGA establishes the reading cadency, based on a zero cross signal to sync disturbance with the fundamental frequency signal. Voltage signals in the output of PLC-UAQ are raised in magnitude by an audio amplifier and its output is sent to a series transformer, which injects the disturbances on three phases of the grid. Monitoring is made by an acquisition module which is formed by the PLC-UAQ board and a signal conditioning stage, obtaining current and voltage waveforms. The results show that the system is capable of generating the disturbances oscillatory transient, SAG, SWELL, fluctuations, harmonics and notching on a 1hp three-phase AC motor which was used as a test load.

(Keywords: DDS, FPGA, disturbances, injection, series)

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca de Maestría con número de CVU 488720.

A la Universidad Autónoma de Querétaro por la Beca de Posgrado con número de expediente 231190.

A mi asesor el Dr. René de Jesús Romero Troncoso por la confianza que ha depositado en mí, por sus enseñanzas y por la oportunidad de trabajar bajo su dirección.

Al Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos y al Dr. David Granados Lieberman por todo su apoyo, por los ánimos, la confianza, la paciencia y sobre todo por su constante ayuda.

Al Dr. Luis Morales Velázquez por su infinita paciencia, su disponibilidad para siempre resolver mis dudas y por todo el aprendizaje que obtuve gracias a él.

A mis amigos de posgrado Arturo Jaen, Benigno Muñoz y Armando García por su ayuda, su apoyo y sobre todo por su amistad.

A todos mis compañeros de HSP Digital Martín, Carlos, José Luis, Arturín, Luis, Emmanuel y Paton por la magnífica experiencia de trabajo, de crecimiento profesional y personal y por todos los buenos momentos.

A mis padres María de la Luz y Antonio, a mis hermanos Julio, Ana y Diana, y a mi sobrino Josué por ser la familia que son para mí y brindarme siempre su apoyo y su amor.

A mi novio Gustavo por su comprensión y su paciencia, y por darme ánimos siempre.

TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	11
1.1 ANTECEDENTES.....	12
1.2 OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	14
1.2.1 <i>Objetivos generales y particulares</i>	14
1.2.2 <i>Hipótesis</i>	15
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	15
1.4 PLANTEAMIENTO GENERAL.....	16
2. REVISIÓN DE LA LITERATURA	18
2.1 ESTADO DEL ARTE.....	18
2.2 SISTEMAS TRIFÁSICOS.....	19
2.3 CLASIFICACIÓN DE LOS DISTURBIOS ELÉCTRICOS.....	20
2.3.1 <i>Transitorios</i>	20
2.3.2 <i>Variaciones de corta duración</i>	23
2.3.3 <i>Variaciones de larga duración</i>	24
2.3.4 <i>Desequilibrio de voltaje</i>	25
2.3.5 <i>Distorsión de forma de onda</i>	25
2.3.6 <i>Fluctuaciones de voltaje</i>	27
2.3.7 <i>Variaciones de frecuencia</i>	28
2.4 AMPLIFICADORES Y TRANSFORMADORES.....	28
2.5 PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES Y CALIDAD DE LA ENERGÍA.....	30
2.6 PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES EN FPGA.....	30
2.6.1 <i>Sintetizadores digitales de onda</i>	31
2.7 TRANSFORMADA DE FOURIER DE TIEMPO CORTO (SHORT TIME FOURIER TRANSFORM).....	33
3. METODOLOGÍA	34
3.1 GENERADOR DE DISTURBIOS.....	34
3.1.1 <i>Módulo software</i>	35
3.1.2 <i>Módulo hardware</i>	40
3.2 TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	47
3.3 FUENTE DE ALIMENTACIÓN.....	48

3.4	CARGA DE PRUEBA.....	48
4.	EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS.....	49
4.1	BANCO DE PRUEBAS	49
4.2	CASOS DE ESTUDIO	50
4.3	RESULTADOS	51
4.3.1	<i>Transitorio oscilatorio</i>	52
4.3.2	<i>SAG y SWELL</i>	54
4.3.3	<i>Fluctuaciones</i>	58
4.3.4	<i>Armónicos</i>	60
4.3.5	<i>Notching</i>	63
5.	CONCLUSIONES	65
6.	REFERENCIAS.....	67

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro

1 Terminología IEEE, norma 1159-1995	21
2 Modelos matemáticos de los disturbios.....	37
3 Instrucciones de operación del sistema	43
4 Casos de estudio transitorio oscilatorio.....	50
5 Casos de estudio SAG y SWELL	50
6 Casos de estudio fluctuaciones.....	51
7 Casos de estudio armónicos	51
8 Casos de estudio notching	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura

1. Diagrama general del sistema.....	16
2. Uso del término calida de la energía, 1968-2004	19
3. Diagrama del transformador.....	29
4. Acumulador de fase	32
5. Sintetizador de formas de onda arbitraria.....	33
6. Diagrama general del sistema.....	34
7. Intefaz gráfica de usuario	35
8. Ventana GUI y simulación, transitorio oscilatorio	37
9. Ventana GUI y simulación, SAG	38
10. Ventana GUI y simulación, SWELL.....	38
11. Ventana GUI y simulación, fluctuaciones	39
12. Ventana GUI y simulación, armónicos	39
13. Ventana GUI y simulación, notching	40
14. Tarjeta PLC-UAQ	41
15. Diagrama a bloques del sintetizador de señales	42
16. Diagrama a bloques del módulo Mshynt	44
17. Amplificador de audio KAM-3465	46
18. Transformador SQ15T125H	47
19. Circuito detector de cruce por cero	47

Figura

20. Tarjeta de acondicionamiento de señales	48
21. Banco de pruebas	50
22. Señales de voltaje en tiempo transitorio oscilatorio.....	52
23. Análisis STFT, transitorio caso 1	53
24. Análisis STFT, transitorio caso 2.....	53
25. Señales de voltaje en tiempo SAG.....	54
26. Análisis STFT, SAG caso 1	55
27. Análisis STFT, SAG caso 2.....	55
28. Señales de voltaje en tiempo SWELL	56
29. Análisis STFT, SWELL caso 1	57
30. Análisis STFT, SWELL caso 2	57
31. Señales de voltaje en tiempo fluctuaciones.....	58
32. Análisis STFT, fluctuaciones caso 1.....	59
33. Análisis STFT, fluctuaciones caso 2.....	59
34. Señales de voltaje en tiempo armónicos.....	60
35. Análisis STFT, Armónicos caso 1.....	61
36. Análisis STFT, Armónicos caso 2.....	62
37. Forma de onda de voltaje armónicos combinados	62
38. Análisis tiempo-frecuencia, armónicos caso 3.....	62
39. Señales de voltaje en tiempo notching.....	63

Figura

40. Análisis STFT, notching caso 1 64

41. Análisis STFT, notching caso 2 64

1. INTRODUCCIÓN

Desde hace poco más de treinta años la cantidad de equipo eléctrico se ha incrementado dramáticamente. Éste puede causar disturbios eléctricos y también ser afectado por ellos. Debido a esto, el interés de los usuarios en la naturaleza y la frecuencia de los disturbios se ha incrementado y el asunto se ha vuelto conocido con el título de Calidad de la Energía (ALSTOM, 2002). El monitoreo de la Calidad de la Energía es el proceso de recolectar, analizar e interpretar datos para convertirlos en información útil. El proceso de recolección de datos es usualmente realizado por una medición continua de voltaje y corriente durante un período extenso, el análisis e interpretación ha sido tradicionalmente hecho manualmente, pero avances recientes en el campo del procesamiento digital de señales e inteligencia artificial han hecho posible el diseño de sistemas que automáticamente realicen la tarea con la mínima intervención humana (Dugan, 2003).

En este trabajo se propone la creación de un sistema que facilite el estudio de la calidad de la energía mediante la generación y monitoreo de disturbios eléctricos como los presentes en la línea eléctrica. La propuesta se basa en una implementación hardware mediante el uso de FPGAs (Field Programmable Gate Array, Arreglo de Compuertas Programables en Campo) y de técnicas de procesamiento digital de señales, donde se crean los disturbios a partir de señales sintéticas, con parámetros especificados por el usuario, teniendo como resultado final un sistema de emulación y monitoreo de disturbios eléctricos en sistemas trifásicos.

La tesis se encuentra organizada en 5 capítulos los cuales se resumen a continuación. En el capítulo 1 se presenta una descripción del problema y los esfuerzos que se han realizado para resolverlo; se plantean los objetivos del trabajo y la forma general en la que éste enfrenta el problema. El capítulo 2 presenta la revisión de la literatura, estableciendo las bases teóricas necesarias para la solución del problema planteado. La metodología propuesta y seguida en

la realización del trabajo se presenta en el capítulo 3. Los resultados obtenidos y su discusión se muestran en el capítulo 4, en tanto que en el capítulo 5 se muestran las conclusiones y prospectivas.

1.1 Antecedentes

Para analizar el comportamiento del equipo en condiciones similares a las reales, diversos trabajos para la generación de disturbios en la línea eléctrica han sido propuestos. Algunos de éstos consisten en el uso de software computacional como la herramienta Simulink de Matlab, (Rocha y Madrigal, 2005) que fue empleada para simular un sistema eléctrico y generar un disturbio SAG (depresión de voltaje) en particular. Reaz et al., (2006) utilizaron un software de simulación para el diseño en lenguaje VHDL (Very High Speed Integrated Circuit Language, Lenguaje de Descripción Hardware de Circuitos Integrados de muy Alta Velocidad) de un sistema capaz de clasificar disturbios eléctricos. Penghui et al., (2010) desarrollaron un sistema de monitoreo y análisis de calidad de la energía basado en el entorno LabVIEW® (National Instruments, 2013). Sin embargo, los trabajos mencionados anteriormente presentan desventajas, por ejemplo, el alto costo computacional que representan y sólo se llevan a cabo en forma de simulación.

Para superar algunas de esas desventajas, otros trabajos proponen sistemas software-hardware para la generación y monitoreo de la calidad de la energía. García et al., (2007) realizaron la generación desde PC de archivos con secuencias de datos numéricos y mediante el uso de una tarjeta de conversión digital-analógico obtuvieron señales de voltaje que posteriormente amplificaron al nivel de la red eléctrica. Rajkumar et al., (2012) utilizaron una computadora personal como carga no lineal con el fin de generar un tipo de disturbio (armónicos) en el suministro de energía. Cheng y Chen., (2011) desarrollaron un generador de señales arbitrarias utilizando un microcontrolador (AT89S52), un circuito DDS (Direct Digital Synthesis, Síntesis Digital Directa) (AT89S52) y un convertidor digital-analógico (AD7520). Zhang et al., (2010) evaluaron el desempeño en tiempo real del método propuesto mediante un banco de pruebas

cuya fuente es un generador de disturbios eléctricos FLUKE 61000A, en tanto que un DSP (Digital Signal Processor, Procesador Digital de Señales), un FPGA y un circuito periférico simple son utilizados para la adquisición y procesamiento. Montaña et al., (2012) emplearon LabVIEW® para la generación de diversos tipos de disturbios en forma de datos y con el módulo de conversión digital-analógico de la tarjeta NI PXI 6733 de National Instruments, generaron señales a la salida de tres canales para la emulación de un sistema trifásico. Por su parte Liu et al., (2013) propusieron un sistema que consta de dos computadoras personales: una host y una esclava; la primera ejecuta una interfaz desarrollada en LabVIEW® en la que se capturan las características de las señales y se envían a la segunda, la cual tiene como función transferir esos datos a un FPGA que proporciona señales senoidales, cuadradas y triangulares en términos de síntesis digital directa, y la salida se obtiene con el uso de un convertidor digital-analógico y un filtro pasabajas. Granados-Lieberman et. al., (2013) propusieron un arreglo de un transformador variable, uno de acoplamiento y un relé de estado sólido, debido a que el transformador variable permite la regulación del voltaje proporcionado por el transformador de acoplamiento, lograron variaciones en el voltaje de entrada a una máquina CNC (Computer Numerical Control, Control Numérico por Computadora), mediante los contactos normalmente abierto y normalmente cerrado del relé, provocando disturbios SAG en la maquinaria. No obstante, los trabajos mencionados presentan ciertas desventajas debidas, por ejemplo, al alto costo de los dispositivos de generación de señales y las tarjetas de adquisición de datos comerciales, el trabajo computacional debido a la dependencia software que aún poseen, la velocidad en el procesamiento de los datos y el control manual que los compone.

Por otra parte, la generación de ondas sintéticas es una herramienta de gran utilidad en la emulación de disturbios eléctricos. Al respecto, diversas técnicas de síntesis digital directa han sido propuestas. Wen et al., (2004) presentaron una arquitectura basada en mínimos cuadrados para generar señales senoidales que posteriormente compararon con series de Taylor para encontrar el

polinomio de grado menor que implementaron en un chip TSMC 0.25 μm 1P5M tecnología CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, Semiconductor Complementario de Óxido Metálico), consiguiendo una pureza espectral de 100 dB. Por su parte, Harris (2007) presentó un sintetizador que combina las arquitecturas de un oscilador y un CORDIC , y mediante un control automático de ganancia para mejorar fase, consiguió generar señales senoidales de cualquier ángulo, lo que permitió obtener una pureza espectral de 150 dB.

1.2 Objetivos e hipótesis

1.2.1 Objetivos generales y particulares

Objetivo general: Desarrollar un sistema que permita la inyección y monitoreo de disturbios a la línea eléctrica mediante una plataforma software-hardware que genere los datos necesarios para el análisis en la calidad de la energía.

Objetivos particulares:

- Desarrollar modelos para la generación de ondas arbitrarias mediante deducción matemática.
- Diseñar e implementar estructuras digitales en HDL para la creación de un generador de señales arbitrarias.
- Seleccionar un transformador y amplificador comerciales que cumplan con los requerimientos del sistema (ancho de banda, relación de voltaje y potencia), para su uso como dispositivos de acoplamiento y amplificación, respectivamente.
- Desarrollar mediante software una interfaz que incluya la visualización gráfica de los disturbios a generar y de las señales monitoreadas.
- Probar la funcionalidad del sistema realizando la inyección en un motor trifásico, como carga de prueba, de los disturbios: transitorio oscilatorio, SAG, SWELL, fluctuaciones, armónicos y notching.

1.2.2 Hipótesis

La generación y monitoreo de disturbios eléctricos que permita el análisis en la calidad de la energía, se logrará mediante el diseño e implementación de estructuras digitales de síntesis digital de formas de onda en HDL y la selección de dispositivos eléctricos y electrónicos comerciales.

1.3 Justificación

El monitoreo de la calidad de la energía es necesario para caracterizar fenómenos electromagnéticos en un lugar en particular de un circuito eléctrico. En algunos casos, el objetivo del monitoreo es diagnosticar incompatibilidades entre la fuente de energía eléctrica y la carga; en otros, puede ser usado para predecir el funcionamiento futuro del equipo.

Por otra parte, la aparición de disturbios en la línea eléctrica se produce de manera continua, lo que trae consigo diversos problemas. Un disturbio que afecta una computadora de control en un complejo industrial grande puede fácilmente terminar en la interrupción de un proceso. La producción perdida durante el reinicio representa un gran costo para el negocio, por esta razón la demanda de los usuarios en lo concerniente a la Calidad de la Energía se vuelve crítica, volviéndose imperativo establecer un sistema que permita el estudio de los disturbios mediante su generación e integración a la línea eléctrica.

Además, existe un conjunto de características deseables para el sintetizador de formas de onda, tales como: generación de ondas arbitrarias, parámetros personalizables por el usuario y bajo costo en comparación con los sintetizadores comerciales; el uso de la tecnología FPGA hace posible la implementación del generador capaz de conectarse con otros sistemas y con las características descritas anteriormente.

Con este trabajo se aporta un sistema que tiene la capacidad de realizar la generación y monitoreo de disturbios eléctricos mediante una plataforma

hardware-software. El procesamiento digital de señales se realiza en hardware, esto es, los algoritmos son implementados en FPGA, dado que estos dispositivos permiten el uso de diseños reconfigurables y el procesamiento en paralelo a velocidades muy altas, logrando así un monitoreo de las señales de interés en tiempo real. La inyección de los disturbios a la línea eléctrica se lleva a cabo mediante un transformador y amplificador comerciales, lo que le brinda al sistema una ventaja económica frente a otros sistemas reportados, debido al aprovechamiento de la potencia ya disponible en la red eléctrica.

1.4 Planteamiento general

El planteamiento general del trabajo es mostrado en la Figura 1, consta de tres módulos principales:

1. Generación
2. Inyección
3. Monitoreo

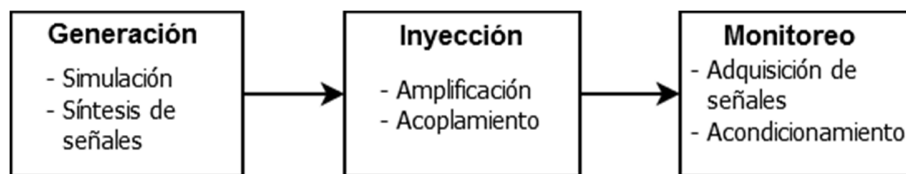


Figura 1. Diagrama general del sistema

El módulo de generación está basado en FPGA y se encarga de simular y generar las señales que posteriormente son amplificadas para ser enviadas al módulo de inyección, donde, mediante un transformador serie, son acopladas en un sistema trifásico de prueba; las señales de salida de éste módulo son digitalizadas y enviadas al FPGA (adquisición). Los datos adquiridos son almacenados en la memoria de acceso aleatorio (RAM) para su envío posterior a la PC mediante el protocolo estándar USB, realizando el proceso de monitoreo.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

En esta sección se presentan las herramientas teóricas requeridas para el planteamiento y desarrollo de la solución al problema abordado en el trabajo de tesis presente.

2.1 Estado del arte

Hace poco más de dos décadas, la instrumentación disponible para la valoración de la calidad de la energía no existía, en su lugar se utilizaban instrumentos de propósito general como osciloscopios o analizadores de espectro; la información obtenida era de baja calidad y tenía que ser procesada después para obtener alguna conclusión. En otros casos, los ingenieros y técnicos estaban equipados con voltímetros y amperímetros rms (root mean square, valor cuadrático medio), así que el análisis solía ser una tarea difícil y posible solamente para los expertos.

Para 1990, el Instituto de Investigación de la Energía Eléctrica (EPRI, Electric Power Research Institute), que es una organización que coordina la investigación de sistemas eléctricos en EU, había establecido proyectos con Electrotek Concepts para el desarrollo de un software integral para el análisis de disturbios y, desde principios de esa década, ha sido posible encontrar medidores comerciales de la calidad de la energía (Mañana, 2007).

Un ejemplo del enorme incremento de la actividad en el área de la calidad de la energía puede ser observado inmediatamente de la Figura 2, la cual proporciona el número de artículos en la base de datos INSPEC que usan el término calidad de la energía en el título, resumen o lista de palabras clave. Especialmente desde 1995 el interés en la calidad de la energía parece haberse incrementado enormemente.

Calidad de la energía es la combinación de la calidad del voltaje y de la corriente. La primera está relacionada con las desviaciones del voltaje real del ideal, y segunda es la definición equivalente para la corriente.

Se puede definir voltaje ideal como una forma de onda sinusoidal de voltaje con amplitud y frecuencia constantes, donde éstas son iguales a sus valores nominales. La corriente ideal es también de amplitud y frecuencia constantes, pero adicionalmente la frecuencia de la corriente y su fase son las mismas que las del voltaje. Cualquier desviación del voltaje o corriente de los ideales es un disturbio de la calidad de la energía (Bollen y Gu, 2006).

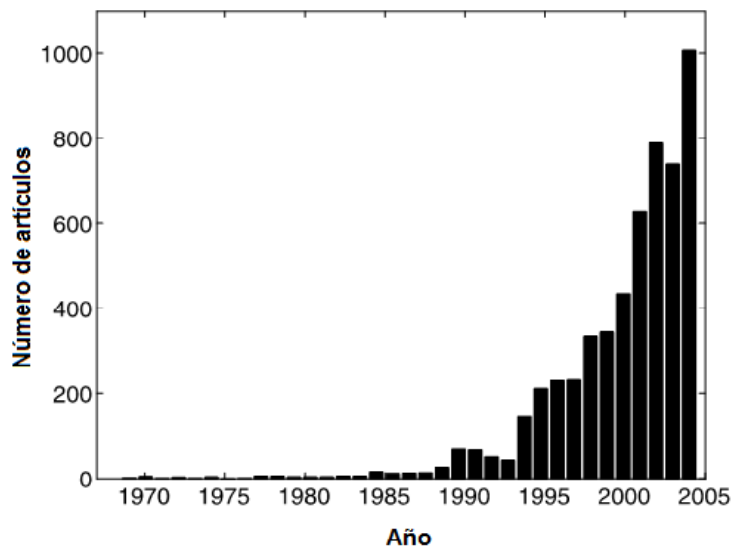


Figura 2. Uso del término calidad de la energía, 1968-2004

2.2 Sistemas trifásicos

La energía eléctrica es generada, transmitida y distribuida en forma de un sistema de 3 fases. Los hogares y establecimientos pequeños están conectados a energía de 1 fase representando solamente una parte del sistema básico de 3 fases. El sistema trifásico se prefiere sobre el de una sola fase debido a importantes razones:

1. Los motores, generadores y transformadores trifásicos son más simples, baratos y eficientes.
2. La transmisión trifásica puede proporcionar mayor energía para una carga y costo dados.

3. La regulación de voltaje de las líneas de transmisión trifásica es inherentemente mejor.

El conocimiento de la energía trifásica y los circuitos de 3 fases es, entonces, esencial para entender la tecnología de la energía (Wildi, 2002).

2.3 Clasificación de los disturbios eléctricos

Los disturbios eléctricos se encuentran clasificados de acuerdo a su magnitud y duración; el IEEE tiene como estándar, en lo referido a recomendaciones prácticas para el monitoreo de la Calidad de la Energía, la norma 1159-1995. El comité de la IEEE recomienda la terminología que se resume en el Cuadro 1.

2.3.1 Transitorios

El término transitorios ha sido usado en el análisis de las variaciones de la energía por un largo tiempo. Su nombre inmediatamente evoca la noción de un evento que es indeseable pero momentáneo en naturaleza (IEEE, 1995). Un transitorio es un pulso de voltaje de alta energía y corta duración impreso en la forma de onda de corriente alterna (Whitaker, 1999).

En términos generales, los transitorios pueden ser clasificados en dos categorías: impulsivos y oscilatorios.

2.3.1.1 *Transitorio impulsivo*

Un transitorio impulsivo es un cambio repentino en la condición de estado estable del voltaje, corriente o ambos, que es unidireccional en polaridad (cualquiera, positivo o negativo).

Los transitorios impulsivos están normalmente caracterizados por sus tiempos de levantamiento y caída, aunque puede ser también descrito por su contenido espectral (IEEE, 1995). Por ejemplo, un transitorio 1.2/50 μ s 2000V llega a su valor pico de 2000V en 1.2 μ s, y entonces decae a la mitad de su valor pico en 50 μ s.

Cuadro 1 Terminología IEEE, norma 1159-1995

Categoría	Tipos	Duración típica
Transitorios	Oscilaciones, impulsos	Menos de 1 ciclo
Variaciones de corta duración	Sags, swells, interrupciones	Menos de 1 ciclo
Variaciones de larga duración	Subtensiones, sobretensiones, interrupciones sostenidas	0.5 – 30 ciclos
Desequilibrio de tensión	-----	Más de 1 minuto
Distorsión de forma de onda	Armónicas, ruido notching	Estado estacionario
Fluctuaciones de tensión	-----	Intermitentes
Variación de frecuencia	-----	Menos de 10 segundos

La causa más común de los transitorios impulsivos es iluminación (IEEE, 1995). La onda 1.2/50 ha sido definida como curva estándar y es usada para probar equipo contra voltajes y corrientes inducidos por iluminación (Bollen y Gu, 2006). El tiempo de inicio de esta forma de onda está definido como 1.67 veces el intervalo de tiempo entre el 30% y 90% de los puntos picos en el borde delantero de la forma de onda. El estándar especifica que una tolerancia de $\pm 30\%$ aplica al

tiempo de inicio de 1.2 μs y una de $\pm 20\%$ aplica al tiempo de 50 μs para la mitad del valor.

Una relación matemática simple que describe esta forma de onda es $V(t)$, dada por:

$$V(t) = AV_p[1 - e^{-t/\tau_1}]e^{-t/\tau_2} \quad (1)$$

Los parámetros en la ecuación anterior tienen los valores:

$$\tau_1 = 0.4074 \mu s$$

$$\tau_2 = 0.6822 \mu s$$

$$A = 1.037$$

Donde t es el tiempo ($t \geq 0$), y V_p es el valor pico de $V(t)$.

Así se tiene una constante de tiempo τ_1 para el borde delantero de la onda, y una constante τ_2 para la trasera, además se tiene la amplitud de la onda expresada como el producto del valor pico de voltaje V_p , y una constante de escala A (Standler, 2002).

2.3.1.2 Transitorio oscilatorio

Un transitorio oscilatorio consiste de un voltaje o corriente cuyos valores instantáneos cambian de polaridad rápidamente. Está descrito por su contenido espectral (frecuencia predominante), duración y magnitud (IEEE, 1995).

La ecuación paramétrica que describe el transitorio oscilatorio es (Janik y Lobos, 2006):

$$v(t) = \sin(\omega t) + \alpha_{osc} \exp\left(-\frac{t - t_b}{\tau_{osc}}\right) \sin[\omega_{nosc}(t - t_b)] \quad (2)$$

Con lo que el transitorio queda descrito por la frecuencia ω_{nosc} y la constante de tiempo de decaimiento τ_{osc} .

Los transitorios oscilatorios pueden ser medidos con o sin la frecuencia fundamental incluida. Cuando se caracteriza al transitorio, es importante indicar la magnitud con y sin la componente fundamental.

Transitorios oscilatorios con una componente de frecuencia primaria mayor a 500 kHz y una duración típica medida en microsegundos son considerados oscilatorios de alta frecuencia. Un transitorio con una componente de frecuencia primaria entre 5 y 500 kHz con una duración medida en decenas de microsegundos se denomina como transitorio de frecuencia media. Si la componente de frecuencia primaria del transitorio es menor de 5 kHz, y una duración de 0.3 a 50 ms, éste es considerado un transitorio de baja frecuencia.

2.3.2 Variaciones de corta duración

Las variaciones de corta duración abarcan la categoría de la IEC (International Electrotechnical Commission, Comisión Electrotécnica Internacional) de depresiones de voltaje (dip) e interrupciones cortas, así como su antítesis o sobrevoltaje (swell).

Los cambios en la corriente que caen dentro de los rangos de duración y magnitud están también incluidos en las variaciones de corta duración.

2.3.2.1 Interrupciones

Una interrupción ocurre cuando la fuente de voltaje o corriente de la carga se reduce a menos de 0.1 pu por un período de tiempo que no excede un minuto; son medidas por su duración dado que la magnitud de voltaje es siempre menor al 10% de la nominal.

2.3.2.2 Depresiones de voltaje SAGS (Dips)

El término sag ha sido usado en la comunidad eléctrica por muchos años para describir un tipo específico de disturbio: un decremento de voltaje de corta duración. La definición IEC para este fenómeno es dip, aunque ambos términos se consideran intercambiables.

Las duraciones de los sags están subdivididas en tres categorías: instantáneas, momentáneas y temporales, lo cual coincide con las tres categorías de interrupciones y swells.

2.3.2.3 Swells

Un swell está definido como un incremento en el voltaje o corriente rms (root mean square, valor cuadrático medio) en la frecuencia de la red para duraciones de 0.5 ciclos a 1 minuto. Las magnitudes se describen por su voltaje restante y típicamente están entre 1.1 y 1.8 pu. Los swells están caracterizados por su magnitud (valor rms) y duración.

2.3.3 Variaciones de larga duración

Abarcan desviaciones rms en frecuencias de la red por más de 1 minuto. Pueden ser sobre-voltaje o sub-voltaje, dependiendo de la causa de la variación y están caracterizadas por gráficas de voltaje rms versus tiempo.

2.3.3.1 Sobrevoltaje

Son el resultado de, por ejemplo, desconectar una carga grande o de variaciones en la compensación activa del sistema (como encender un banco de capacitores). La poca capacidad en la regulación o control del voltaje del sistema resulta en sobrevoltajes.

2.3.3.2 Subvoltaje

Son el resultado de eventos contrarios a aquellos que causan los sobrevoltajes. El término brownout es usado en ocasiones para describir períodos sostenidos de voltaje de baja potencia-frecuencia iniciados como una estrategia para reducir la entrega de energía. El tipo de disturbio descrito por brownout es básicamente el mismo que el descrito por el término undervoltaje definido aquí.

2.3.3.3 Interrupciones sostenidas

La caída a cero de la fuente de voltaje por un período de tiempo mayor a 1 minuto es considerado una interrupción sostenida; generalmente son permanentes por naturaleza y requieren intervención manual para restauración.

2.3.4 Desequilibrio de voltaje

Está definido como la razón de la componente de secuencia negativa con la componente de secuencia positiva.

El desequilibrio puede ser estimado como la desviación máxima del promedio de voltajes o corrientes trifásicos, dividido por el promedio de los voltajes o corrientes trifásicos, expresado en porcentaje:

$$\text{desequilibrio de voltaje} = \frac{(100)(\text{desviación máxima del promedio de voltaje})}{\text{promedio de voltaje}} \quad (3)$$

2.3.5 Distorsión de forma de onda

Es una desviación de estado estable de una señal sinusoidal ideal de frecuencia de la red principalmente caracterizada por el contenido espectral de la desviación.

2.3.5.1 Offset de corriente directa

La presencia de un voltaje de corriente directa en un sistema de potencia de corriente alterna es llamada offset de DC. La corriente directa en redes de corriente alterna puede ser perjudicial debido a un incremento en la saturación del transformador, atenuación adicional del aislamiento y otros efectos adversos.

2.3.5.2 Armónicos

Los armónicos son usualmente voltajes o corrientes senoidales que tienen altas frecuencias y que son múltiplos enteros de la frecuencia a la cual el sistema de alimentación está diseñado para operar. Los armónicos se combinan con el voltaje o corriente fundamentales y producen distorsión de forma de onda.

Los niveles de la distorsión armónica pueden ser caracterizados por el espectro armónico con magnitudes y ángulos de fase de cada componente armónica individual. Es también común usar una sola cantidad, la distorsión armónica total, como una medida de la magnitud de la distorsión armónica (IEEE, 1995).

Cuando la forma de onda es no sinusoidal, pero periódica con período de un ciclo (de la frecuencia del sistema, 50 o 60 Hz), las formas de onda del voltaje y la corriente pueden ser descompuestas en una suma de componentes armónicos. Para el voltaje se tiene:

$$v(t) = V_0 + \sum_{h=1}^H V_h \sqrt{2} \cos(h\omega t - \alpha_h) \quad (4)$$

Con $\omega = 2\pi f_o$ y f_o la frecuencia fundamental o frecuencia del sistema.

2.3.5.3 Interarmónicos

Las formas de onda de voltaje y corriente usualmente contienen componentes que no son un múltiplo entero de la frecuencia del sistema. Para medir esos llamados Interarmónicos es necesario medir sobre un período más largo que un ciclo. Para un voltaje con sólo una componente interarmónica presente a una frecuencia ξf_o , se puede escribir mediante la ecuación (5).

$$v(t) = V_0(t) + \sum_{h=1}^H V_h \sqrt{2} \cos(h\omega t - \alpha_h) + V_\xi \sqrt{2} \cos(\xi\omega t + \alpha_\xi) \quad (5)$$

La presencia de Interarmónicos puede ser interpretada en el dominio del tiempo como la señal siendo periódica, pero con un período de más de un ciclo (Bollen y Gu, 2006).

2.3.5.4 Notching

Es un disturbio de voltaje periódico causado por la operación normal de los dispositivos electrónicos de potencia cuando la corriente es conmutada de una fase a otra.

El notching de voltaje representa un caso especial que cae entre los transitorios y la distorsión armónica. Dado que ocurre continuamente (estado

estable), puede ser caracterizado a través del espectro armónico del voltaje afectado. Sin embargo, los componentes de frecuencia asociados con el notching pueden ser bastante altos y pueden no ser caracterizados con el equipo normalmente usados para el análisis de armónicos.

2.3.5.5 Ruido

Son señales eléctricas no deseadas con contenido espectral de ancho de banda menor de 200 kHz superpuestas sobre el voltaje o corriente del sistema en conductores de fase, o encontrado en conductores neutrales o líneas de señal.

El rango de frecuencia y nivel de magnitud del ruido depende de la fuente que produce el ruido y las características del sistema. La magnitud típica del ruido es menor del 1% de la magnitud del voltaje (IEEE, 1995).

2.3.6 Fluctuaciones de voltaje

Están descritas como una modulación de amplitud del voltaje de frecuencia fundamental de acuerdo a la ecuación (6).

$$v(t) = \sqrt{2}V[1 + m(t)]\cos(2\pi f_0 t) \quad (6)$$

Donde V es el valor rms de la forma de onda del voltaje sin disturbio (la onda portadora), f_0 la frecuencia fundamental, y $m(t)$ la modulación. La ecuación (4) teóricamente describe cualquier disturbio de voltaje con la elección apropiada de $m(t)$, por ejemplo, si se le da una forma rectangular, resulta en un sag o swell de voltaje.

Si la señal de frecuencia fundamental es modulada con una fluctuación sinusoidal de voltaje:

$$m(t) = M\cos(2\pi f_M t + \phi_M) \quad (7)$$

Resulta en el voltaje fluctuante siguiente:

$$v(t) = \sqrt{2}V[1 + M\cos(2\pi f_M t + \phi_M)]\cos(2\pi f_0 t) \quad (8)$$

Esto puede ser escrito como la suma de tres señales sinusoidales:

$$v(t) = \sqrt{2}V\cos(2\pi f_0 t) + \frac{1}{2}\sqrt{2}MV\cos[2\pi(f_0 + f_M)t + \phi_M] \\ + \frac{1}{2}\sqrt{2}MV\cos[2\pi(f_0 - f_M)t + \phi_M] \quad (9)$$

2.3.7 Variaciones de frecuencia

La frecuencia de la red está directamente relacionada con la velocidad rotacional de los generadores del sistema. En cualquier instante, la frecuencia depende del balance entre la carga y la capacidad de la generación disponible. Cuando este balance dinámico se altera, pequeños cambios de frecuencia ocurren. El tamaño del cambio de frecuencia y su duración depende de las características de la carga y la respuesta del sistema de generación a cambios de ésta (IEEE, 1995).

2.4 Amplificadores y transformadores

Un amplificador es un dispositivo electrónico que recibe una señal a la entrada y proporciona una versión más grande de ésta a la salida.

Los amplificadores de potencia proporcionan principalmente energía suficiente a una carga de salida (para activar algún otro dispositivo de potencia), usualmente en magnitudes de algunos watts o de decenas de éstos. Las principales características de un amplificador de gran señal son la eficiencia de potencia del circuito y el acoplamiento de impedancia con el dispositivo de salida (Boylestad, 2003).

Un transformador es el enlace entre los sistemas generadores de energía y las líneas de transmisión, y entre las líneas de distintos niveles de voltaje (Granger y Stevenson, 1994); es una máquina eléctrica estática que transforma la

energía eléctrica recibida en otra de características distintas, bien sea de tensión, intensidad, etc. (Álvarez, 2009).

La base física de un transformador es la inductancia mutua entre dos circuitos enlazados por un flujo magnético común a través de un camino de baja reluctancia como se muestra en la Figura 3 (Bharat Heavy Electricals Limited, 2003).

Para un transformador ideal, la relación de transformación de voltaje está dada por:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} = K \quad (10)$$

Donde:

N_1 : Número de vueltas del primario

N_2 : Número de vueltas del secundario

V_1 : Voltaje en el primario

V_2 : Voltaje en el secundario

Se puede usar un transformador para proveer una transferencia máxima de potencia entre dos circuitos de CA que tienen diferentes impedancias (Serway, 2005).

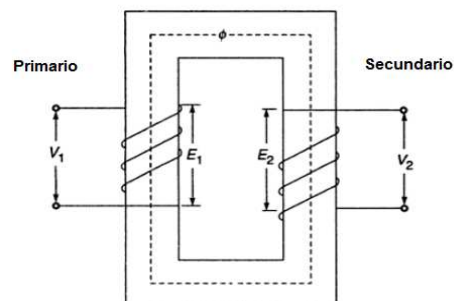


Figura 3. Diagrama del transformador

2.5 Procesamiento digital de señales y calidad de la energía

El procesamiento digital de señales, consta de la extracción de características e información de señales digitales medidas. Como área de investigación, el procesamiento de señales cubre cualquier tipo de señal. Una amplia variedad de técnicas de procesamiento digital de señales han sido desarrolladas a través de los años desde el punto de vista teórico y del de aplicación para un amplio rango de señales. El procesamiento de los datos de la calidad de la energía puede ser descrito por etapas. Los datos están disponibles en formas de onda muestreadas de voltaje y/o corriente; desde estas formas de onda, se extrae información y el procesamiento de señales juega un rol esencial en este paso. Para obtener conocimiento de la información, se necesitan herramientas de procesamiento de señales y conocimiento de sistemas de potencia. Lo que es importante en cada etapa es una clase de refinamiento de la anterior. Se puede decir que el procesamiento de señales extrae y mejora la información que está oculta o que no es perceptible directamente.

2.6 Procesamiento digital de señales en FPGA

La creciente demanda de comunicación móvil y portátil requiere sistemas de alto desempeño empleando técnicas de procesamiento de señales que permitan la operación tan cerca como sea posible al límite teórico de Shannon. Estos sistemas no sólo deben proveer un rendimiento excepcional, sino también, debido a las presiones fiscales y del mercado, deben ser lo suficientemente flexibles para permitir el seguimiento de la evolución de los estándares.

Los arreglos de compuertas programables en campo (FPGAs) son dispositivos semiconductores que pueden programarse después de ser manufacturados. En lugar de estar restringidos a una función *hardware* predeterminada, un FPGA permite programar características y funciones al producto, adaptarlo a los nuevos estándares y reconfigurar el *hardware* para aplicaciones específicas (Altera Corporation, 2013).

La adopción de FPGA en las industrias ha sido impulsada por el hecho de que los chips combinan lo mejor de los ASICs (Application-specific integrated circuit, Circuitos integrados de aplicación específica) y de los sistemas basados en procesadores (National Instruments, 2013). Esos beneficios incluyen los siguientes:

- Tiempos más rápidos de respuesta de E/S y funcionalidad especializada.
- Potencia de cómputo superior a la de procesadores digitales de señales.
- Rápida integración de prototipos y verificación sin el proceso de fabricación del diseño personalizado de ASIC.
- Implementación de la funcionalidad personalizada con la fiabilidad de hardware determinístico dedicado.

Capacidad de actualización en campo y eliminación de los gastos por rediseño personalizado de ASIC y mantenimiento.

2.6.1 Sintetizadores digitales de onda

Un sintetizador digital de formas de onda es un dispositivo que permite emular por medios digitales una señal analógica, además de poder controlar una señal de frecuencia, amplitud, simetría, modulación, número de canales y capacidad de almacenamiento (Amezquita, 2012). Este dispositivo presenta varias ventajas como: alta resolución, gran velocidad de cambio de la frecuencia de salida e interfaz digital para control remoto desde PC.

La síntesis digital directa se basa en una tabla, que es una memoria ROM 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. El esquema básico de un DDS consta de un acumulador de fase (un registro digital) que determina cuál de las muestras instantáneas almacenadas se va a buscar, un decodificador fase-amplitud que obtiene el valor correspondiente y está basado en una memoria ROM, y un convertidor digital-analógico (Pallás, 2006).

El acumulador de fase, Figura 4, es una estructura digital que a cada pulso activo de reloj suma el valor de una fase P con el valor A acumulado previamente, y volviéndose almacenar en A para producir una nueva salida Q. De esa forma, esta señal tiene un comportamiento de rampa digital cuya frecuencia está dada por:

$$f_o = \frac{P}{2^n} f_{CLK} \quad (11)$$

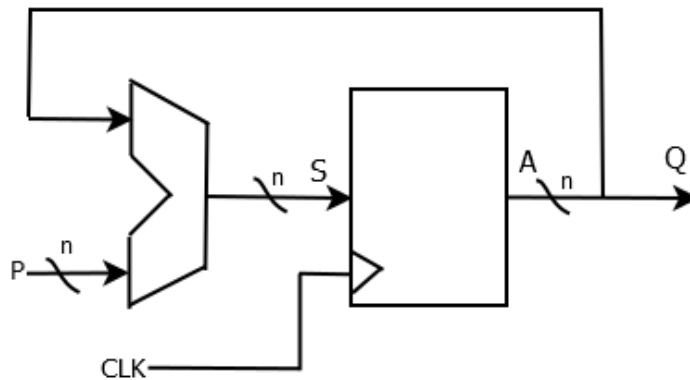


Figura 4. Acumulador de fase

Mediante la Ecuación (11) se puede producir un generador de base de tiempo cuya frecuencia es directamente proporcional a la frecuencia base de reloj.

Con el acumulador de fase ya es posible obtener de manera directa las formas de onda: cuadrada y rampa o diente de sierra mediante un Convertidor Digital-Analógico (DAC); sin embargo, la onda sinusoidal no se puede obtener de forma tan directa y es necesario procesar la información para generar esta señal. La técnica más simple para generar la forma de onda sinusoidal (y en general, cualquier forma de onda arbitraria) consiste en la definición de una LUT que convierta la fase a la forma de onda deseada, de tal manera que el sintetizador de formas de ondas arbitrarias quede como se muestra en la Figura 5.

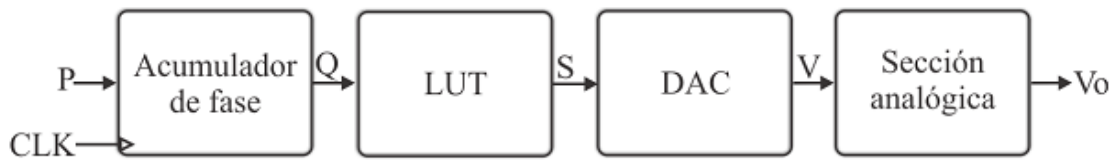


Figura 5. Sintetizador de formas de onda arbitraria

La estructura digital de la Figura 4, en función de la frecuencia base de la señal CLK, produce una rampa (diente de sierra) digital Q con una frecuencia proporcional a P. La LUT convierte o decodifica la señal Q en una forma de onda arbitraria S. El DAC convierte la señal digital S en una tensión analógica V y la sección analógica de salida se encarga de proporcionar los niveles de tensión y acoplamiento de impedancias para dar como resultado final la señal Vo que es la forma de onda deseada (Romero-Troncoso, 2007).

2.7 Transformada de Fourier de Tiempo Corto (Short Time Fourier Transform)

La STFT (Short Time Fourier Transform) es usada para el análisis tiempo-frecuencia de señales no estacionarias, donde sólo el uso de la transformada de Fourier se vuelve inadecuado; esta técnica descompone la señal variante en el tiempo en componentes del dominio tiempo-frecuencia, proporcionando entonces una perspectiva de la evolución en tiempo de cada componente de la señal (Gu y Bollen, 2000).

La idea básica detrás de la STFT es aplicar la Transformada de Fourier a una porción de la señal original, obtenida introduciendo una función ventana la cual localizará, truncará (y pesará), la señal analizada, produciendo el contenido espectral de la porción de ésta dentro del intervalo de tiempo definido por el ancho de la función ventana. La STFT (una representación tiempo-frecuencia de la señal) se obtiene deslizando la ventana a lo largo de la señal (Stankovic et. al, 2013).

3. METODOLOGÍA

En este capítulo se describen los procedimientos que se llevaron a cabo en el desarrollo del trabajo, los cuales incluyen el material y equipo utilizados, las estructuras digitales implementadas, así como sus principios de funcionamiento y demás justificaciones teóricas requeridas.

La estructura general del trabajo es la mostrada en la Figura 6, la cual consta de los siguientes módulos: generador de disturbios y monitoreo como componentes de sistema implementado, y fuente de alimentación y carga de prueba como módulos externos.

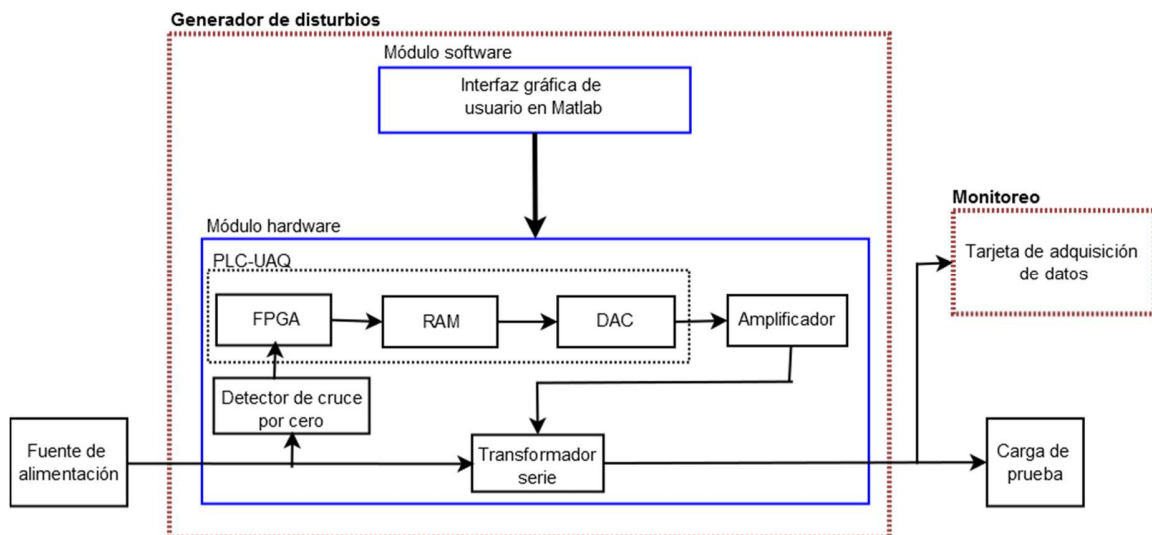


Figura 6. Diagrama general del sistema

3.1 Generador de disturbios

Es el módulo encargado de generar las formas de onda y niveles de voltaje correspondientes a los disturbios: transitorio oscilatorio, SAG, SWELL, armónicos, fluctuaciones, y notching; está compuesto a su vez de un módulo software y un módulo hardware.

3.1.1 Módulo software

Mostrado en la Figura 7, se trata de una interfaz gráfica de usuario en Matlab, encargada de la validación de los parámetros de entrada para cada tipo de disturbio, su generación y visualización previa, incluyendo formas de onda del disturbio y fundamental+disturbio.

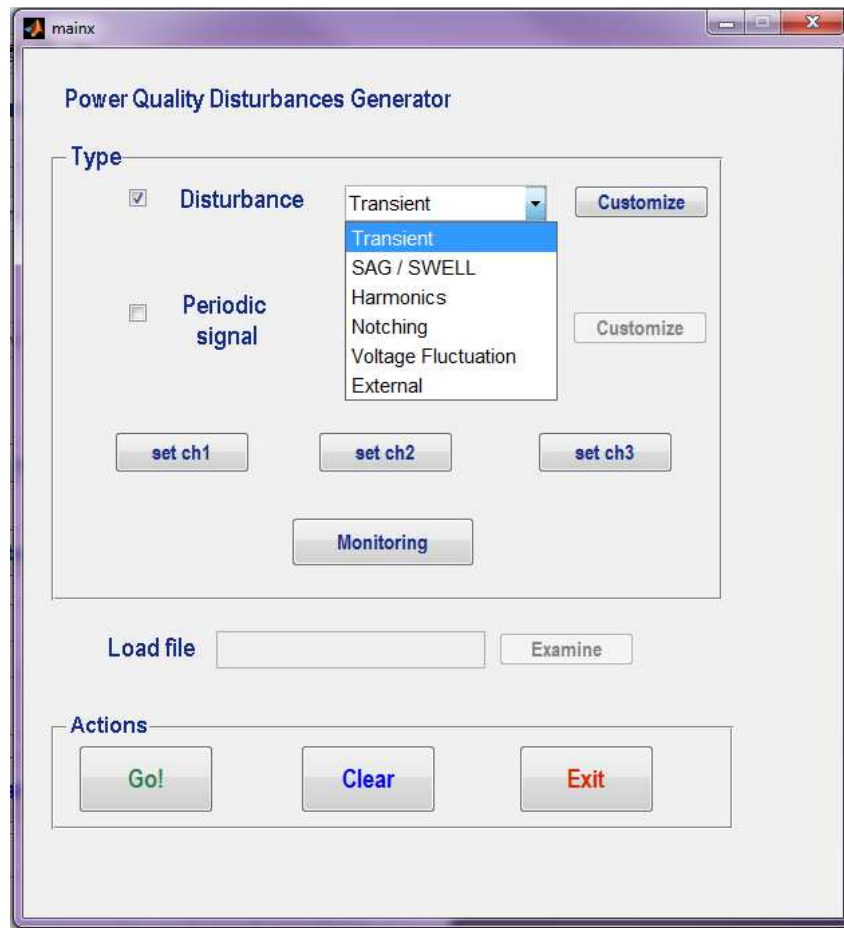


Figura 7. Intefaz gráfica de usuario

En la etapa de validación, se verifica que los valores de entrada no sobrepasen las capacidades del sistema y que tengan magnitudes coherentes para cada parámetro de disturbio.

La generación de los datos de las formas de onda se realiza como lo indica la Ecuación (12), donde el término en **negrita** representa la señal de

frecuencia fundamental f_o (ya disponible) y el término $F(t)$ la forma de onda del disturbio a inyectar por el sistema.

$$v(t) = A_n \sin(2\pi f_o t) + F(t) \quad (12)$$

Así, las expresiones de los seis disturbios bajo prueba son las mostradas en el Cuadro 2 y en donde:

A_n = Amplitud nominal

A_i = Amplitud del disturbio

f_o = Frecuencia fundamental

f_i = Frecuencia del disturbio

t_1 = Tiempo de inicio

t_2 = Tiempo de fin

a = Factor de amortiguamiento

h = Número de armónico

φ_i = Fase del disturbio

φ_h = Fase el armónico

3.1.1.1 *Transitorio oscilatorio*

La ventana de personalización de este disturbio, así como una simulación se muestran en la Figura 8.

Cuadro 2 Modelos matemáticos de los disturbios

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

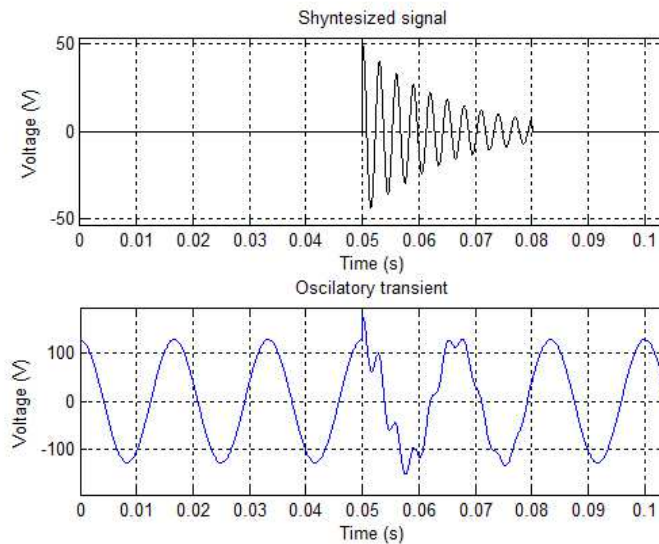
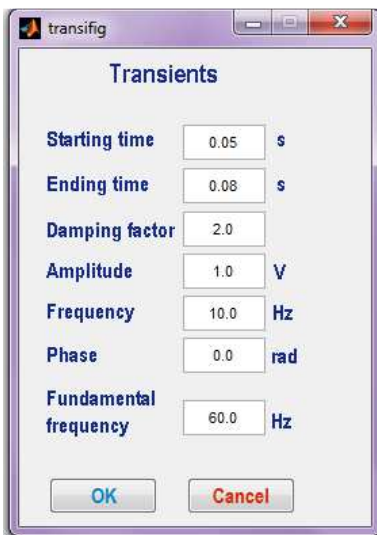


Figura 8. Ventana GUI y simulación, transitorio oscilatorio

3.1.1.2 SAG/SWELL

En la Figura 9 y la Figura 10 se observan la ventana de introducción de parámetros para los disturbios SAG/SWELL, así como sus respectivas simulaciones.

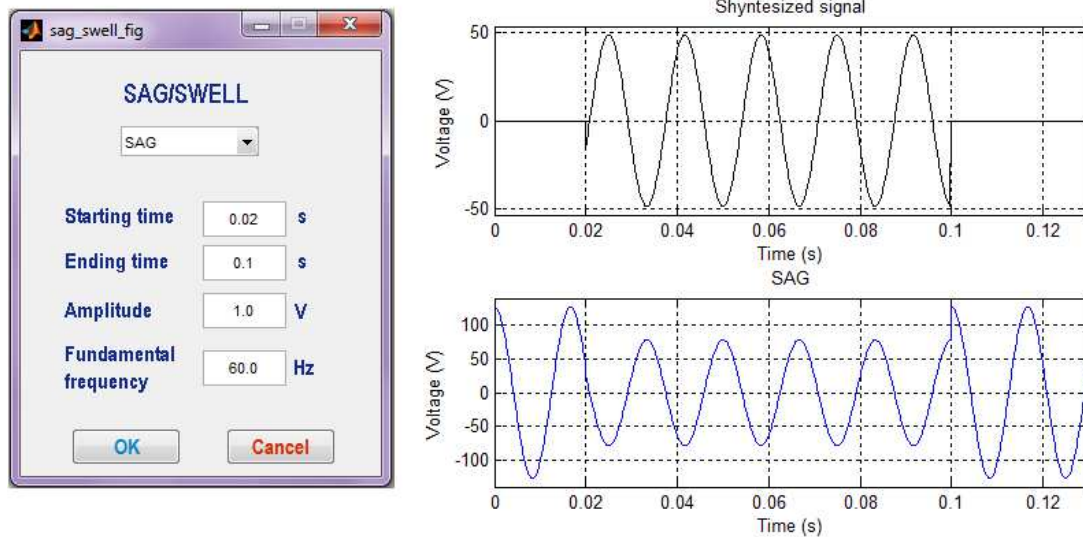


Figura 9. Ventana GUI y simulación, SAG

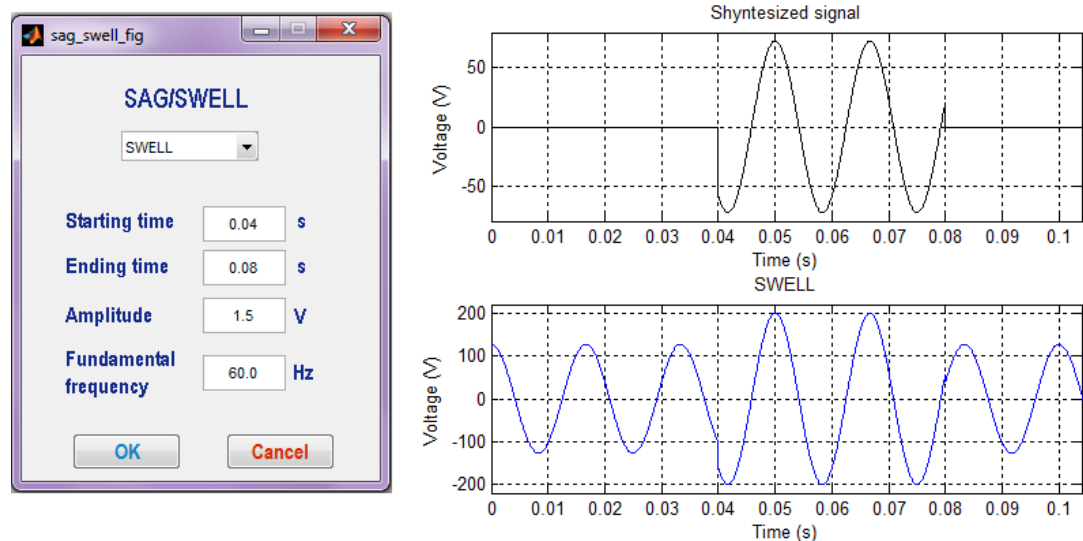


Figura 10. Ventana GUI y simulación, SWELL

3.1.1.3 Fluctuaciones

La ventana de personalización de parámetros para las fluctuaciones y su simulación, son mostradas en la Figura 11.

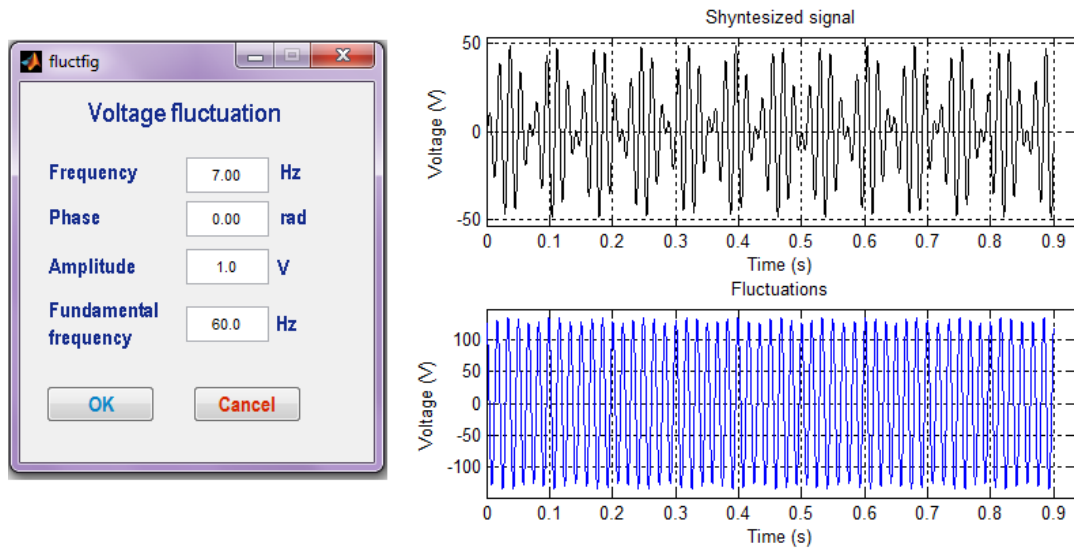


Figura 11. Ventana GUI y simulación, fluctuaciones

3.1.1.4 Armónicos

En la Figura 12 se muestran la ventana de introducción de parámetros y una simulación.

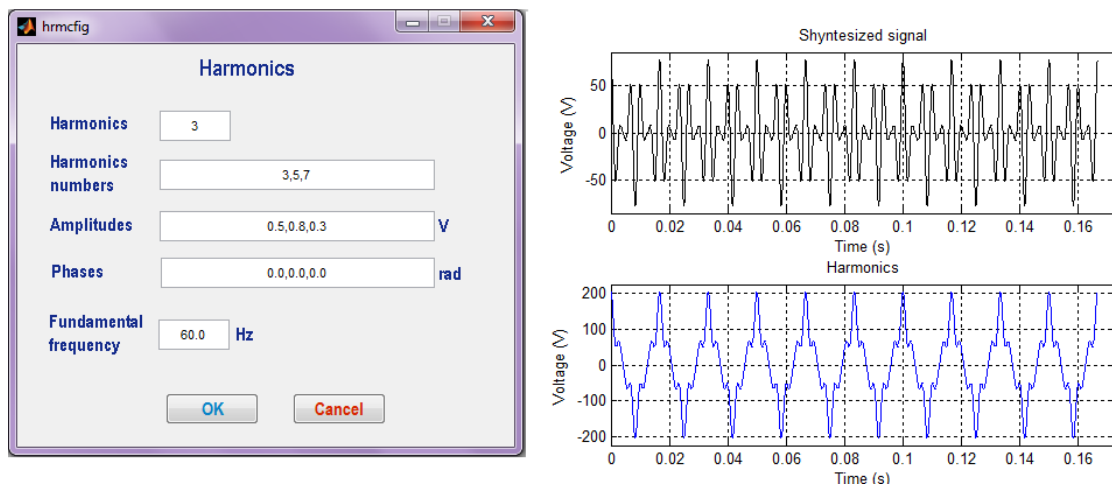


Figura 12. Ventana GUI y simulación, armónicos

3.1.1.5 Notching

La ventana de personalización de forma de onda y una simulación son mostradas en la Figura 13.

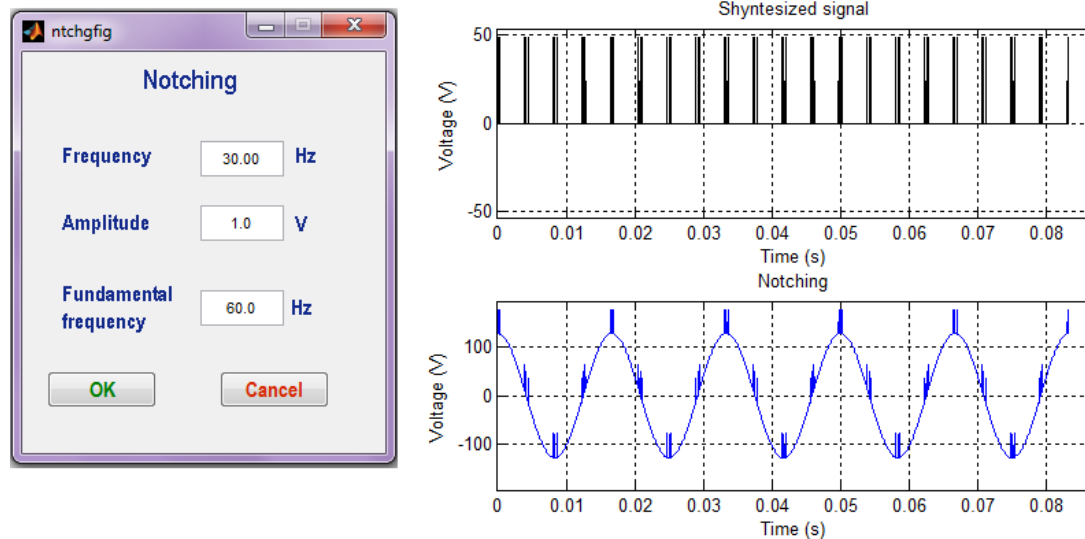


Figura 13. Ventana GUI y simulación, notching

Una vez que la información es generada, el sistema se encarga de normalizar los valores para los rangos de entrada del DAC, y establecer la comunicación con el siguiente módulo para el envío de los parámetros de los disturbios y su forma de onda.

3.1.2 Módulo hardware

Es el encargado de generar las señales analógicas de voltaje de los disturbios, su amplificación y posterior inyección.

3.1.2.1 PLC-UAQ

Es un sistema basado en un FPGA de bajo costo y alta capacidad, propiedad intelectual del grupo de investigación HSP Digital de la Universidad Autónoma de Querétaro; está compuesto de dos partes: el módulo de

procesamiento (MPU) y el módulo de aplicación (SIM), ambos interconectados mediante conectores tipo IDE.

El MPU contiene el cerebro del sistema (FPGA) además, convertidores analógico-digital (ADC) y digital-analógico (DAC) de 16 bits (Figura 14). La tarjeta puede comunicarse con una PC a través de la interfaz RS232 o USB.

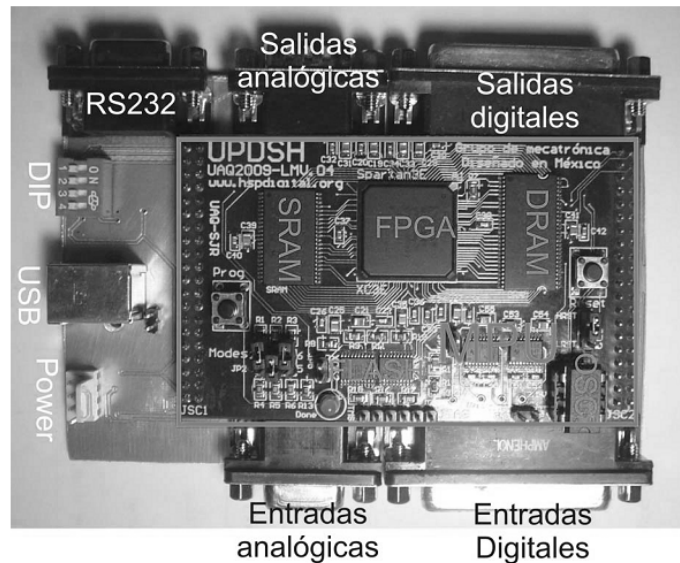


Figura 14. Tarjeta PLC-UAQ

3.1.2.1.1 FPGA

El FPGA es un Spartan-3E de Xilinx de 1,600,000 compuertas; en éste se encuentran contenidas las descripciones en lenguaje HDL necesarias para la comunicación USB, el sintetizador de señales, controlador DAC, sincronización, etc.

El sintetizador de señales es un módulo que se encarga de la generación de las formas de onda requeridas por el sistema para crear los disturbios, el diagrama a bloques de su estructura digital (Figura 15) muestra los componentes de este sistema.

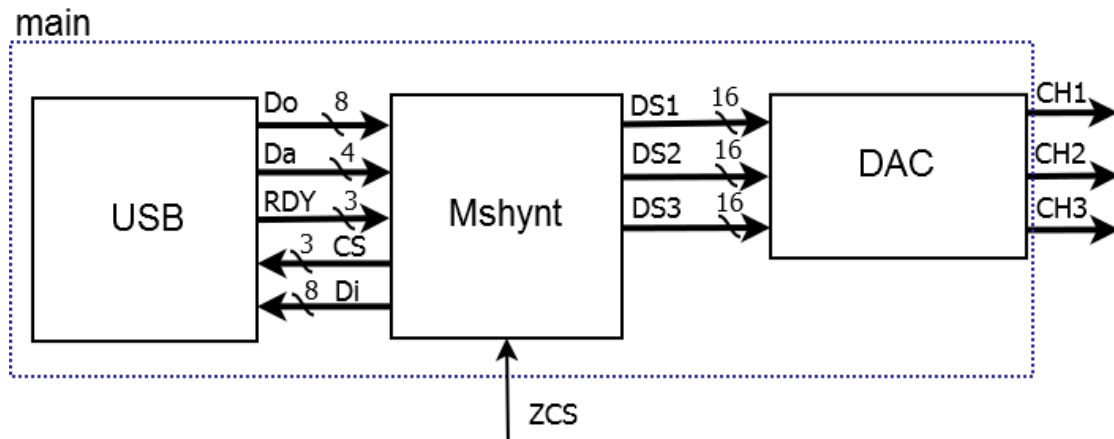


Figura 15. Diagrama a bloques del sintetizador de señales

El bloque USB es una unidad de propósito general, con 1 endpoint de 8 bytes de entrada y 2 endpoint de salida, uno de 8 bytes y otro de 4 bytes; contiene las descripciones requeridas para establecer la comunicación entre el FPGA y otros dispositivos. El endpoint de salida de 4 bytes (Da) es utilizado para recibir los comandos de sistema y direcciones de memoria y el de 8 bytes (Do) cumple la función de transportar los datos de los parámetros constantes y de las formas de onda de las señales a generar. La señal RDY se utiliza para saber cuándo los datos han sido recibidos, y la señal CS se emplea para liberar el bus y recibir más datos.

El módulo Mshynt (Figura 16), se compone de los siguientes módulos principales:

1. Registro de instrucciones, direcciones y datos. Recibe las instrucciones de operación del sistema, descritas en el Cuadro 3, además de los parámetros de las señales que serán sintetizadas (frecuencia, duración, tamaño, periodicidad, desfasamiento), la información de su forma de onda (generada en módulo software) y las direcciones en las que deberán ser almacenadas.

Cuadro 3 Instrucciones de operación del sistema

Instrucción	Operación
00	Reinicio, recepción de parámetros
01	Recepción y escritura en RAM de formas de onda
1x	Lectura de RAM de formas de onda

2. Módulos de sincronización. Estos módulos cumplen la función de sincronizar el funcionamiento de los acumuladores de fase con la señal de línea de la red, para lo cual hacen uso de la señal proveniente del circuito de cruce por cero ZCS.
3. Acumuladores de fase. Establecen la cadencia de lectura de los datos de acuerdo a la frecuencia (o tiempo de duración) deseada de la señal de salida.
4. Multiplexor de direcciones. Dado que la memoria RAM estática sólo cuenta con un bus de direcciones, este módulo se encarga de multiplexar las salidas de los acumuladores de fase para leer los tres canales.
5. SRAM (Memoria RAM estática). Es el módulo digital encargado de generar las señales necesarias para la escritura y lectura del chip de memoria RAM estática.
6. Control de liberación del bus. Este módulo se encarga de la liberación del bus para la recepción de nuevos datos mediante USB, asegurando los tiempos para que los datos sean recibidos y almacenados correctamente.

7. FSM (Máquina de estados finitos principal). Es el módulo encargado de controlar la lectura y escritura de los datos, así como el inicio de operación de los bloques de sincronización.

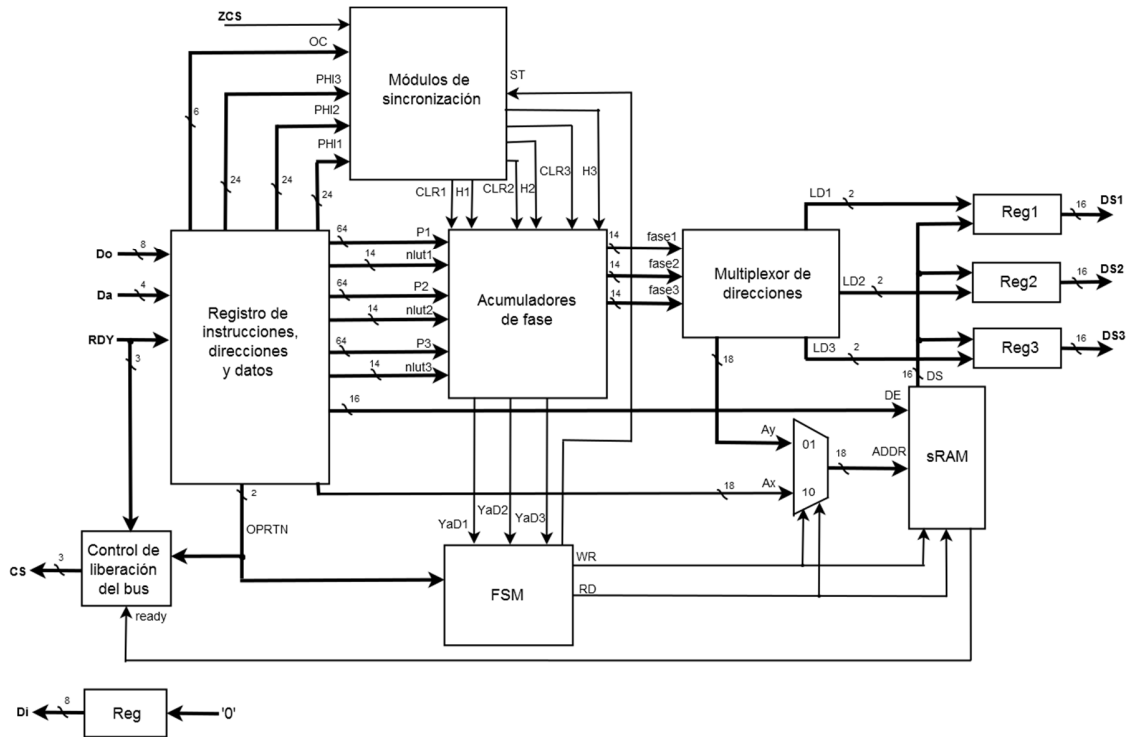


Figura 16. Diagrama a bloques del módulo Mshynt

La síntesis de formas de onda se realiza utilizando la técnica de Síntesis Digital Directa mencionada en el capítulo anterior; para esto se implementó un acumulador de fase de 32 bits cuya salida se truncó a los 14 bits más significativos con el propósito de reducir el espacio en memoria, con lo cual, para el control de la frecuencia de salida, se modificó la ecuación (11) como:

$$P = \frac{f_o}{f_{CLK}} \frac{2^n}{2^m} N_{LUT} \quad (13)$$

Donde:

P	:	Palabra de sintonización
f_o	:	Frecuencia de salida
f_{CLK}	:	Frecuencia de reloj maestro
n	:	Tamaño en bits del acumulador de fase
m	:	Tamaño en bits del acumulador de fase (truncada)
N_{LUT}	:	Número de datos en memoria

La frecuencia de reloj maestro es de 48MHz, la frecuencia de muestreo del DAC es 100 kmuestras/s (33 kmuestras/s por canal) y el número de datos en memoria N_{LUT} se calcula de acuerdo a la frecuencia de muestreo del sistema f_s y la frecuencia de salida deseada f_o como:

$$N_{LUT} = 2^{\lceil \log_2 \left[\frac{f_s}{f_o} \right] \rceil} \quad (14)$$

El módulo DAC es un controlador para el Convertidor Digital Analógico, el cual recibe del bloque anterior la frecuencia de muestreo, y las señales de 16 bits correspondientes a cada uno de los tres canales de salida.

3.1.2.1.2 RAM

Se trata de la memoria RAM estática ISSI 1S61LV55128AL, controlada por un módulo digital, cumple la función de almacenamiento de los datos correspondientes a las formas de onda de los disturbios a generar.

3.1.2.1.3 DAC

Es el chip DAC7565 de Texas Instruments, el cual tiene la función de convertir los datos digitales de 16 bits en señales analógicas de voltaje con un rango de amplitud máximo de 1.22 V rms (para esta aplicación).

3.1.2.2 Amplificador

Previo a la inyección, las señales a la salida de la etapa de generación deben ser amplificadas para llevarlas a niveles significativos en relación a los presentes en la línea de alimentación. Lo anterior se lleva a cabo mediante el KAM-3465 (Figura 17), el cual es un amplificador de audio de dos canales de la marca MITZU® y cuyas especificaciones técnicas son:

- Alimentación: 100 – 120 Vca 60 Hz
- Frecuencia: 20Hz – 20kHz +0/-1 dB
- Potencia de salida: 650W RMS por canal



Figura 17. Amplificador de audio KAM-3465

3.1.2.3 Transformador serie

Encargado del acoplamiento e inyección de la señales (Figura 18), se trata del transformador trifásico de 15 kVA, 440V/220-127V modelo SQ15T125H, marca Square D.

3.1.2.4 Detector de cruce por cero

Mostrado en la Figura 19, es un circuito que se encarga de detectar el cruce por cero de la señal de frecuencia fundamental de la línea de alimentación (una fase), otorgando a la salida una señal de forma de onda cuadrada cuyos niveles bajo y alto corresponden a los semiciclos negativo y positivo de la forma de onda fundamental respectivamente.



Figura 18. Transformador SQ15T125H

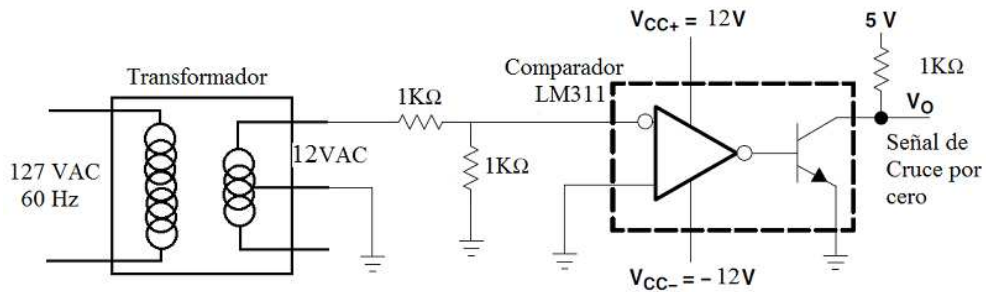


Figura 19. Circuito detector de cruce por cero

3.2 Tarjeta de adquisición de datos

Está compuesta por la tarjeta PLC-UAQ, además de una sección analógica de acondicionamiento de las señales (Figura 20), es capaz de obtener

formas de onda de voltaje y corriente, se comunica con la PC a través del protocolo USB para el envío de los datos recolectados durante la medición.

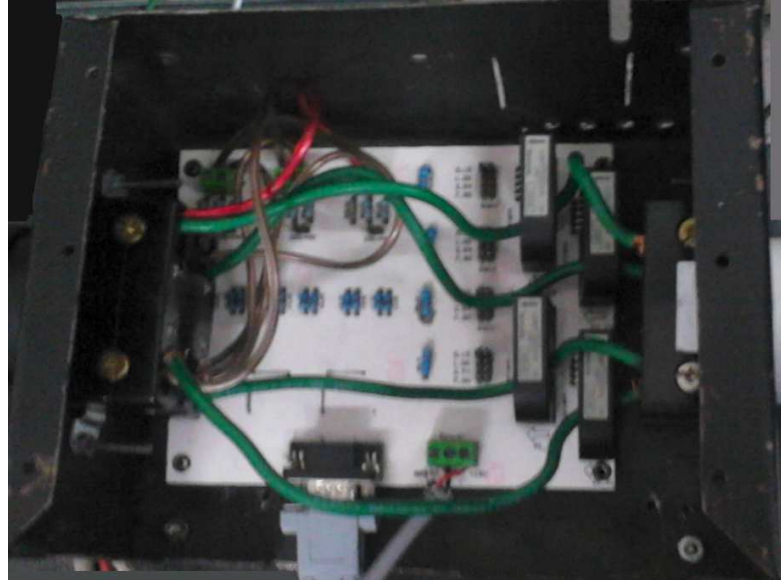


Figura 20. Tarjeta de acondicionamiento de señales

3.3 Fuente de alimentación

Se trata de la conexión a red (línea de alimentación) del Laboratorio de Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro Campus San Juan del Río, la cual proporciona la señal de frecuencia fundamental en 3 fases, requeridas para alimentar la carga de prueba y proporcionar la potencia necesaria a los disturbios para ser generados a niveles apropiados.

3.4 Carga de prueba

Este módulo, es el dispositivo trifásico que actúa como carga para la experimentación, recibiendo directamente las señales de la línea contaminadas con los disturbios generados por el sistema.

4. EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

En esta sección se presentan los casos de estudio considerados para la validación del funcionamiento del sistema, así como los resultados obtenidos en las implementaciones y su discusión.

4.1 Banco de pruebas

Se implementó la configuración mostrada en la Figura 6, tomando como carga de prueba el motor trifásico marca Weg modelo 00136APE48T de 1hp de potencia, e inyectando disturbios en una de las tres fases de la alimentación de éste. La Figura 21 muestra el banco de pruebas con todos los componentes empleados para éstas. Se tiene una PC con la interfaz gráfica de usuario para la introducción de los parámetros de los disturbios, la tarjeta PLC-UAQ para la síntesis de señales, el circuito detector de cruce por cero, el amplificador de audio, el transformador trifásico, el motor como carga de prueba y la tarjeta de adquisición de datos o sistema de monitoreo.

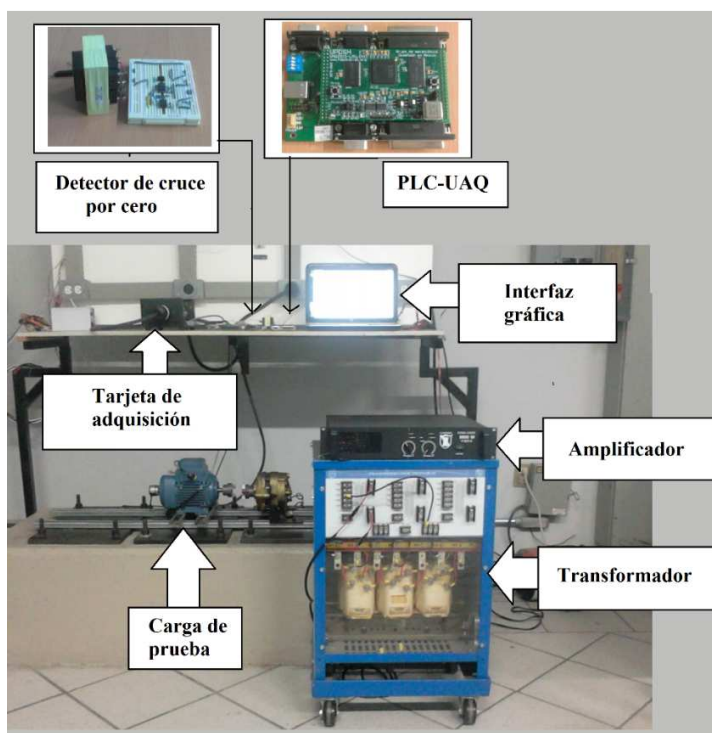


Figura 21. Banco de pruebas

4.2 Casos de estudio

Se plantearon, para cada disturbio 2 casos de estudio (3 para armónicos), en los cuales se variaron parámetros como la amplitud, frecuencia y duración y que se presentan en el Cuadro 4 (transitorio oscilatorio), Cuadro 5 (SAG y SWELL), Cuadro 6 (fluctuaciones), (armónicos) y (notching). Para comprobar la capacidad del sistema de generar e inyectar los disturbios anteriores, se realizó el proceso de monitoreo de la fase de prueba y las señales de voltaje obtenidas se analizaron mediante la técnica de la Transformada de Fourier de Tiempo Corto (STFT), para así observar las formas de onda en tiempo y las componentes en frecuencia presentes.

Cuadro 4 Casos de estudio transitorio oscilatorio

Caso	$A_i(Vrms)$	$f_i(Hz)$	a	Duración (por ciclo)
1	48.63	30	4.0	0.05 s
2	55.02	75	3.0	0.10 s

Cuadro 5 Casos de estudio SAG y SWELL

Caso	SAG		SWELL	
	$A_i(Vrms)$	Duración (ciclos)	$A_i(Vrms)$	Duración (ciclos)
1	35.50	3.0	5.69	5.0
2	19.45	7.0	6.13	8.0

Cuadro 6 Casos de estudio fluctuaciones

Caso	A_i (Vrms)	f_i (Hz)
1	12.35	7.0
2	10.81	15.0

Cuadro 7 Casos de estudio armónicos

Caso	No. de armónicos	h	A_i (Vrms)
1	1	3	6.13
2	1	5	7.00
3	2	9,11	6.17, 5.4

Cuadro 8 Casos de estudio notching

Caso	A_i (Vrms)	f_i (Hz)
1	7.72	120.0
2	10.04	75.0

Para cada caso de estudio se realizaron 4 mediciones (para verificar repetitividad), de 10 segundos cada una, con una frecuencia de muestreo de 6kmuestras/segundo y 12kmuestras/segundo en el caso del notching.

4.3 Resultados

En esta sección se reportan los resultados obtenidos de la implementación del banco de pruebas y los casos de estudio para cada uno de los disturbios,

mostrando la información obtenida mediante el módulo de monitoreo. Para fines de apreciación, se varía la ventana de tiempo para cada disturbio.

4.3.1 Transitorio oscilatorio

Para este disturbio, se especificaron valores de amplitud, factor de amortiguamiento y duración. Las señales en tiempo de voltaje obtenidas se muestran en la Figura 22, en la cual se puede observar la forma de onda de la señal de frecuencia fundamental con el disturbio inyectado, provocando una distorsión en la forma de onda y amplitud de ésta, con lo cual se verifica visualmente que el disturbio ha sido inyectado en la red.

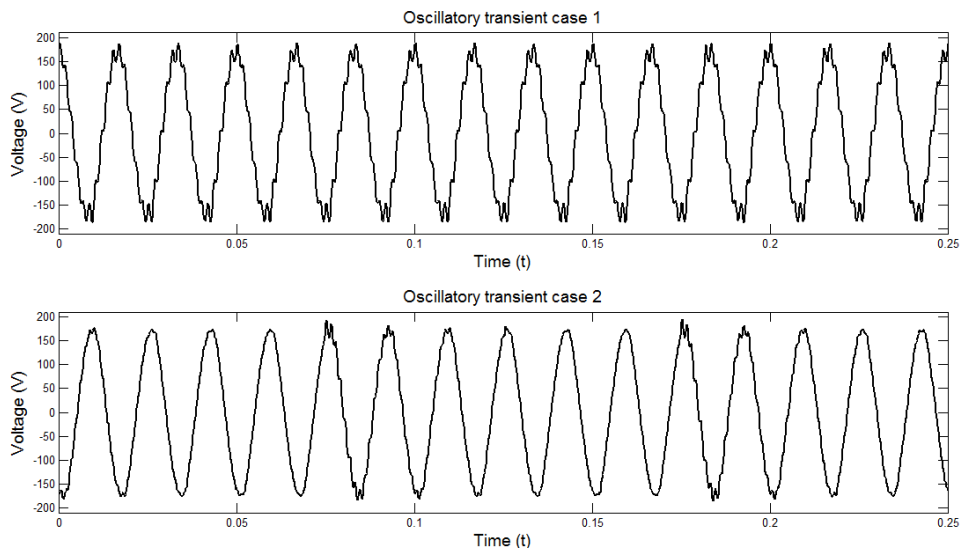


Figura 22. Señales de voltaje en tiempo transitorio oscilatorio

El análisis tiempo-frecuencia para este disturbio se muestra en la Figura 23 (caso 1) y la Figura 24 (caso 2), en ambas se puede apreciar la componente de frecuencia fundamental (60Hz); las componentes en 600 Hz y 750 Hz para el caso 1 y 2 respectivamente, demuestran que los transitorios oscilatorios han sido inyectados en la fase de prueba de acuerdo a los parámetros especificados de frecuencia.

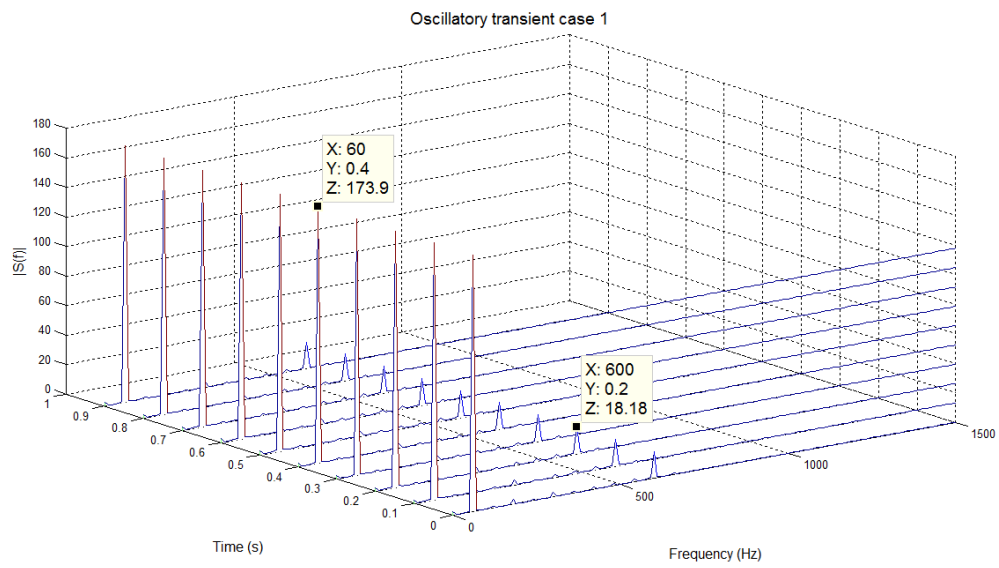


Figura 23. Análisis STFT, transitorio caso 1

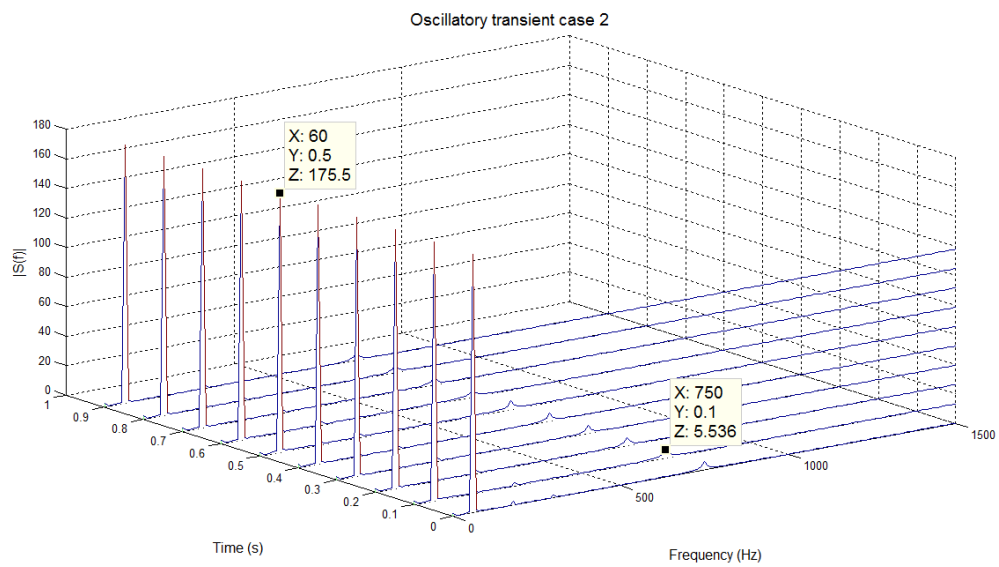


Figura 24. Análisis STFT, transitorio caso 2

4.3.2 SAG y SWELL

Dado que estos disturbios tienen la frecuencia de la señal fundamental, es posible comprobar de forma visual el momento en que ocurren, solamente observando la señal de voltaje en tiempo, por el mismo motivo, al análisis STFT de estos disturbios se le dio una mayor resolución en tiempo, para verificar las duraciones de las señales inyectadas.

La Figura 25 muestra las señales de voltaje en tiempo, de los disturbios SAG, mediante las cuales se puede apreciar el momento en que ocurren y su duración, verificando lo indicado en los parámetros del Cuadro 5.

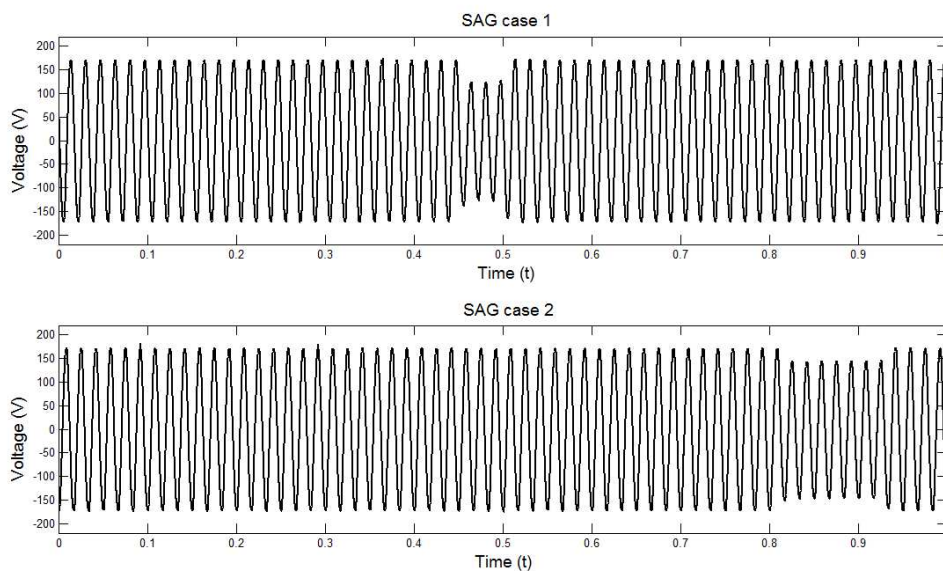


Figura 25. Señales de voltaje en tiempo SAG

La Figura 26 (caso 1) y la Figura 27 (caso 2) corresponden al análisis tiempo-frecuencia de este disturbio, en las mismas es posible observar que no existen componentes significativas en frecuencias distintas a la fundamental (60Hz), en ambas gráficas, también se pueden apreciar las depresiones en la magnitud del voltaje coincidentes con las duraciones indicadas en los casos de

estudio, teniendo una duración mayor la perturbación del caso 2, verificando así la efectividad del sistema en la generación de este disturbio.

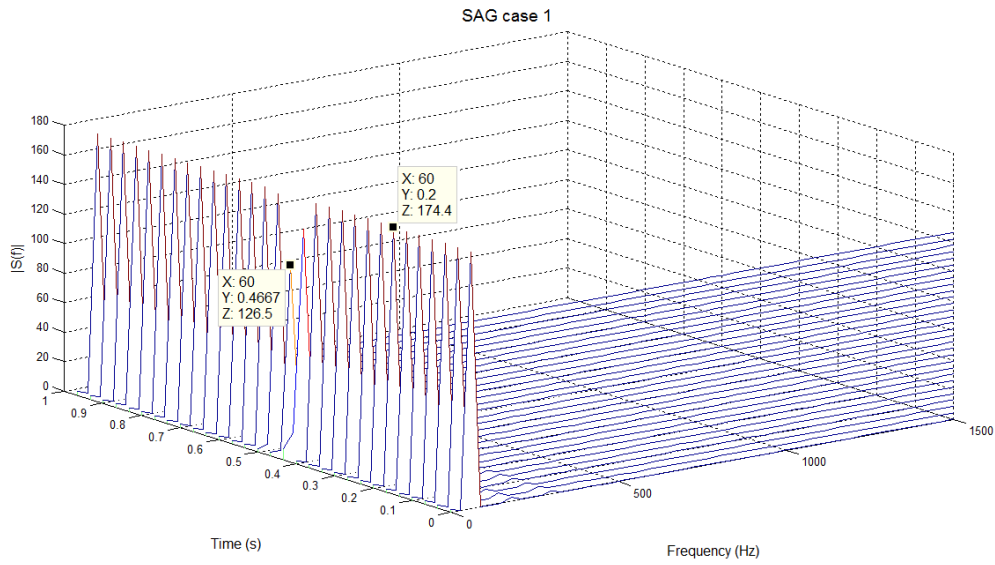


Figura 26. Análisis STFT, SAG caso 1

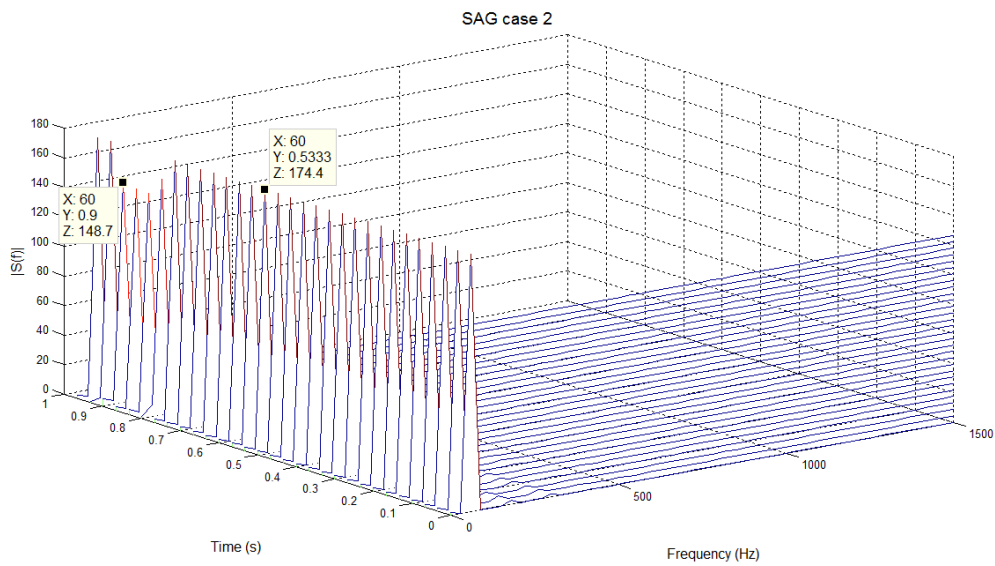


Figura 27. Análisis STFT, SAG caso 2

Las formas de onda de voltaje del disturbio SWELL, son mostrados en la Figura 28 y al igual que con el disturbio anterior, es posible apreciar el momento en que ocurren las perturbaciones y su duración.

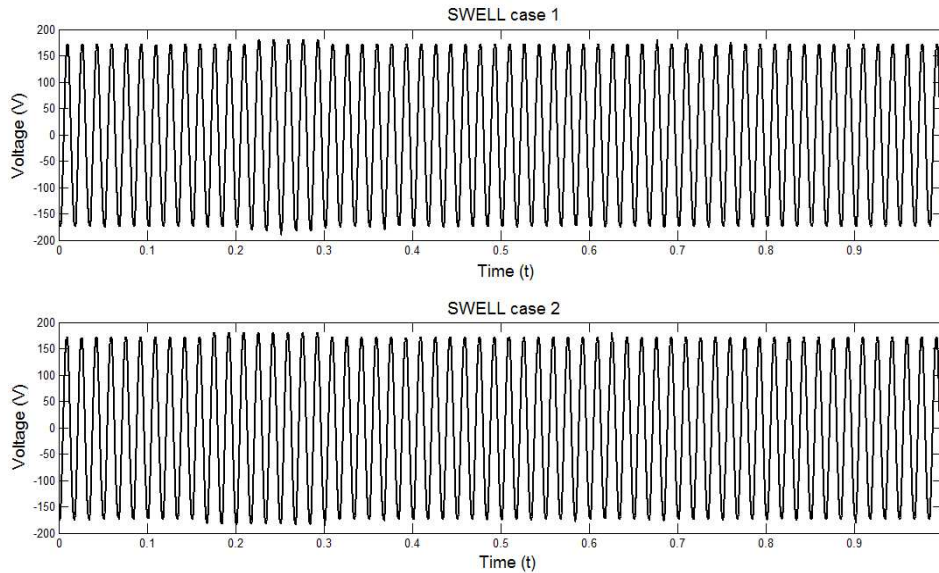


Figura 28. Señales de voltaje en tiempo SWELL

En los casos de prueba para este disturbio, se trataron amplitudes pequeñas, para proteger la carga de sufrir daños graves, aun así las gráficas del análisis tiempo-frecuencia para el caso 1 (Figura 29) y caso 2 (Figura 30), muestran el disturbio en la frecuencia fundamental de la línea (60Hz) y magnitudes superiores a la nominal correspondiente con las elevaciones de voltaje que implica esta perturbación en las duraciones especificadas en el Cuadro 1.

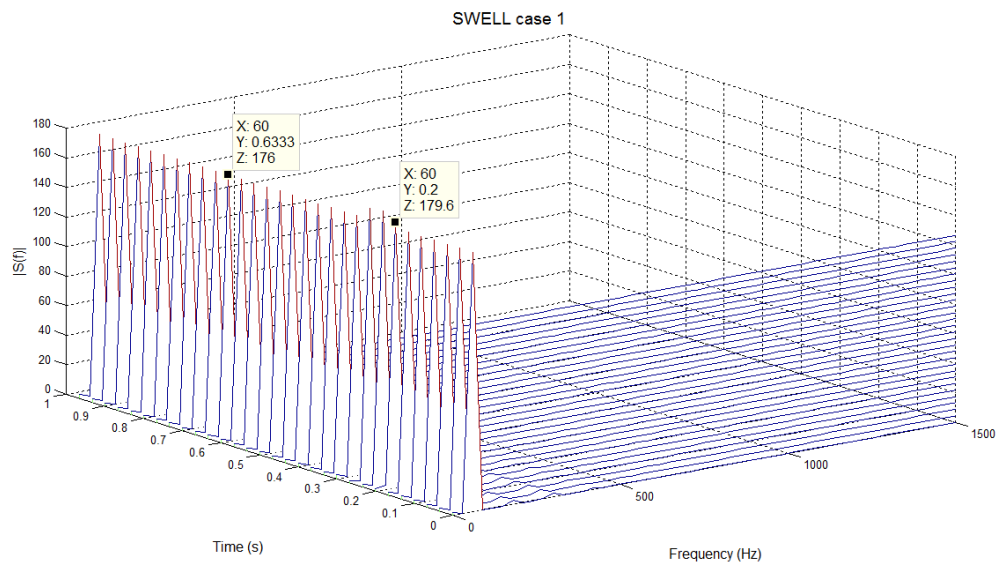


Figura 29. Análisis STFT, SWELL caso 1

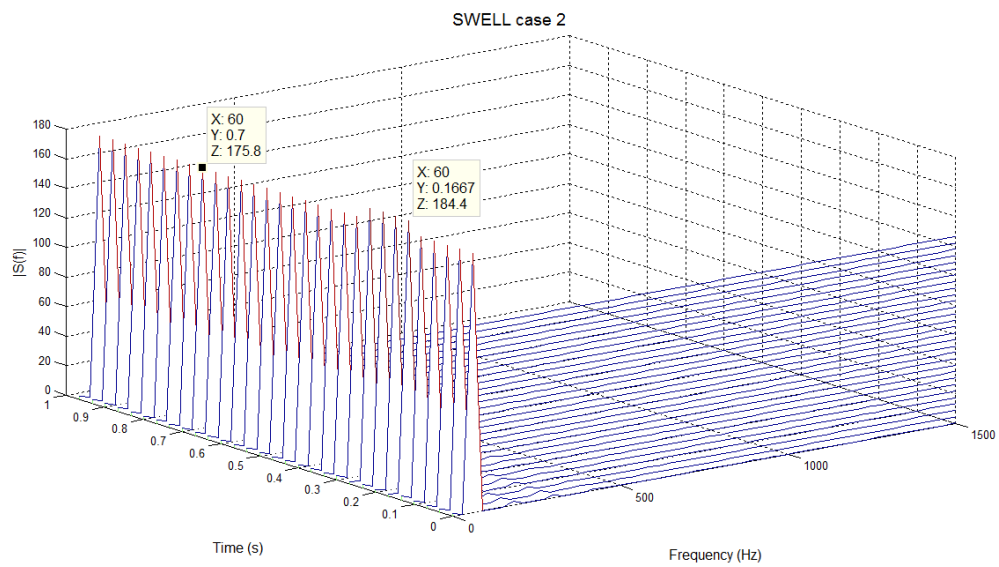


Figura 30. Análisis STFT, SWELL caso 2

4.3.3 Fluctuaciones

Este tipo de disturbios, provocan variaciones en la amplitud de la forma de onda de voltaje de la señal fundamental, provocando una distorsión en la envolvente de ésta, lo cual puede ser comprobado al observar las formas de onda de voltaje en tiempo mostradas en la Figura 31.

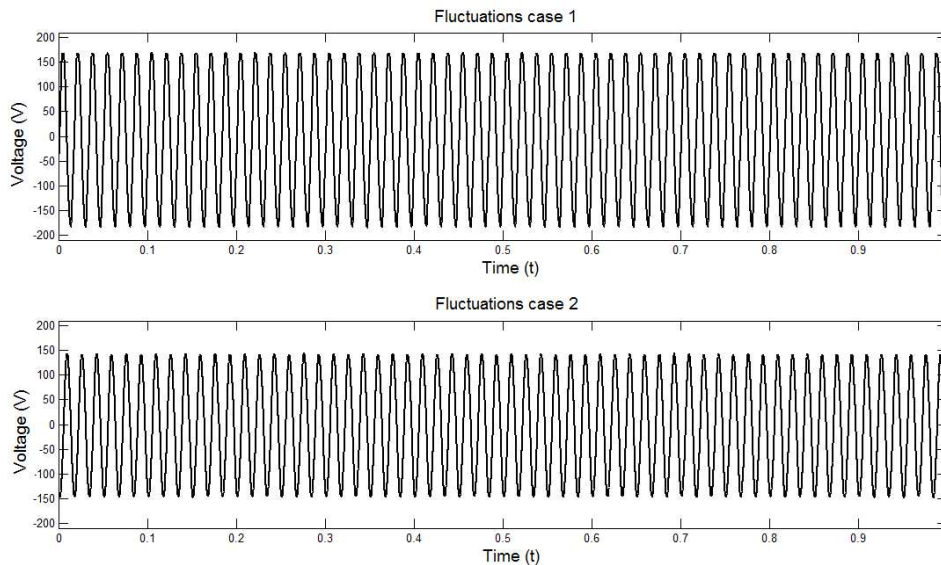


Figura 31. Señales de voltaje en tiempo fluctuaciones

El análisis tiempo-frecuencia para el caso 1 (Figura 32) y caso 2 (Figura 33), muestra la componente de frecuencia fundamental (60Hz) y los lóbulos uno a cada lado de ésta. Para el caso 1, estos componentes aparecen en 54 Hz y 66 Hz, lo cual significa una frecuencia moduladora de 6Hz, lo cual es un valor congruente al fijado para este caso de estudio, también se puede apreciar en la gráfica que la magnitud de estas componentes es similar. Para el caso 2 los lóbulos están situados en 48 Hz y 72 Hz, implicando una frecuencia moduladora de 12Hz, cercano también al valor deseado para este caso, y las magnitudes de estas componentes también son congruentes con lo establecido en los casos de estudio.

Con lo anterior se verifica que el sistema generó exitosamente las fluctuaciones de voltaje.

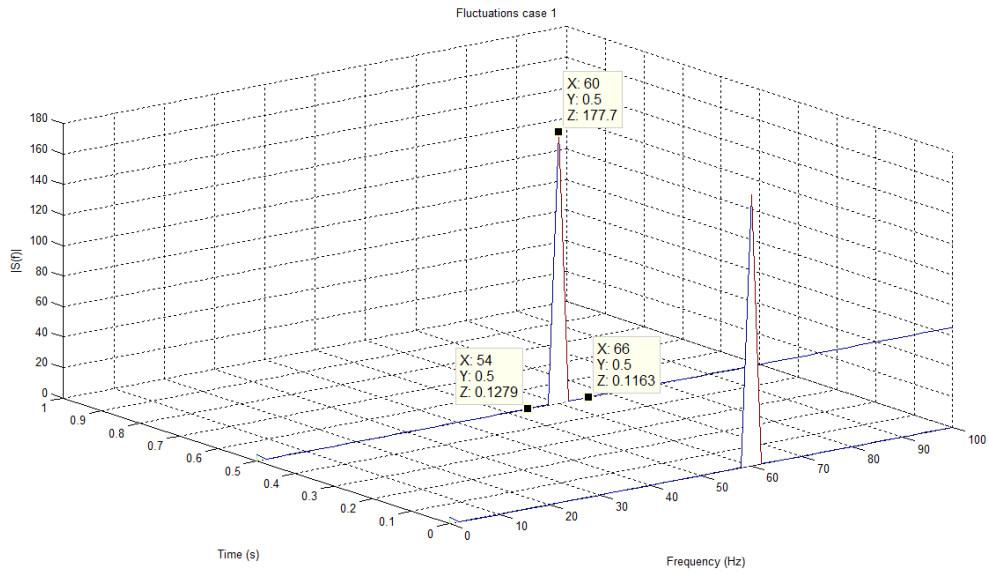


Figura 32. Análisis STFT, fluctuaciones caso 1

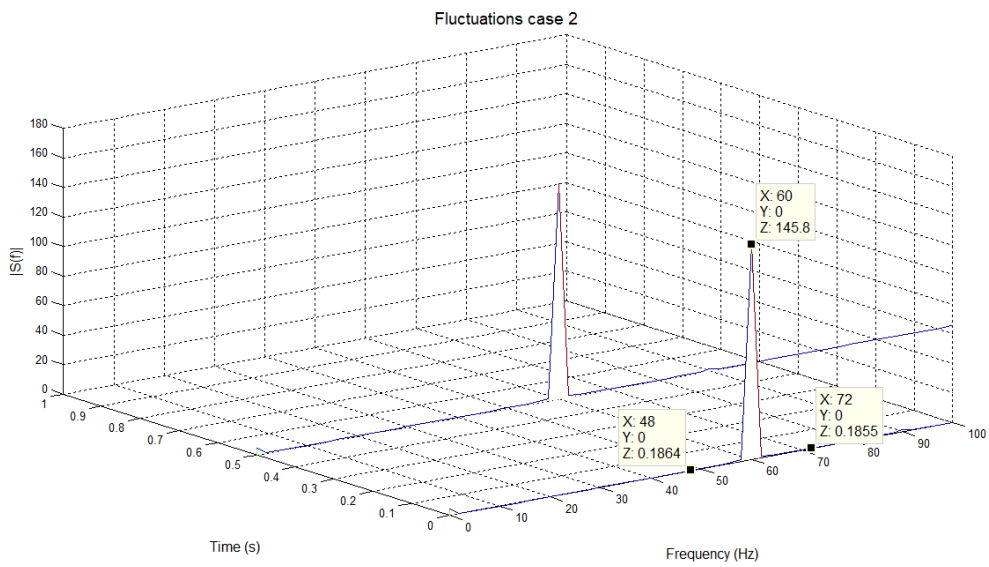


Figura 33. Análisis STFT, fluctuaciones caso 2

4.3.4 Armónicos

Las formas de onda de voltaje en tiempo obtenidas en la generación y monitoreo de este disturbio se muestra en la Figura 34, para los cuales se inyectaron armónicos sencillos de acuerdo a los casos 1 y 2 reportados en el Cuadro 7; observando detenidamente las gráficas en el espacio temporal es posible apreciar la distorsión de forma de onda que produce cada uno de los disturbios considerados.

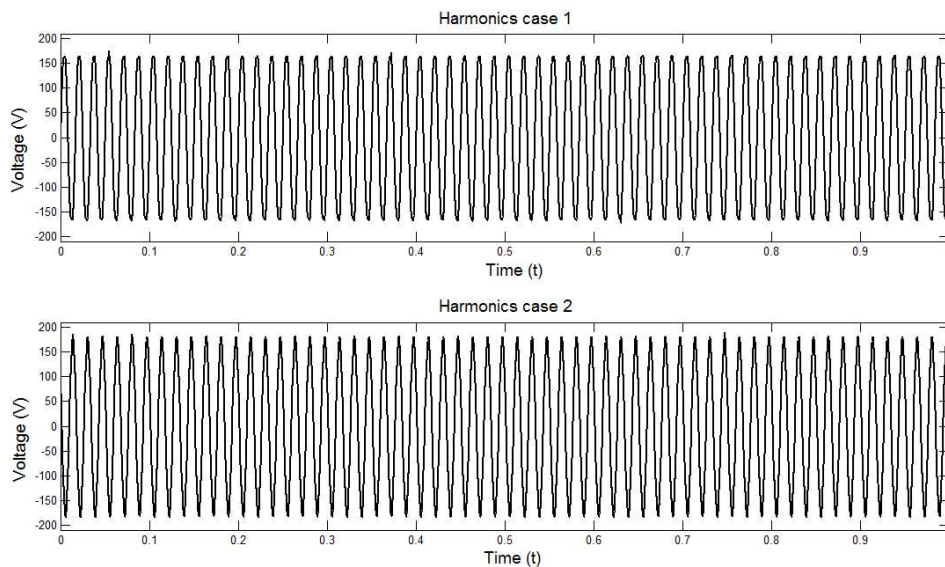


Figura 34. Señales de voltaje en tiempo armónicos

La Figura 35 y la Figura 36 muestran el análisis tiempo-frecuencia de ambos casos de estudio. En las gráficas se puede observar la componente de frecuencia fundamental y las componentes de los armónicos generados por el sistema, los cuales corresponden a un tercer armónico (180Hz, caso 1) y un quinto armónico (300 Hz, caso 2); con lo cual se demostró que el sistema es capaz de generar armónicos sencillos. Por otra parte, la forma de onda de voltaje en tiempo para el tercer caso de estudio (armónicos combinados), se muestra en la Figura 37. De la gráfica de su análisis tiempo-frecuencia (Figura 38), es posible observar

la componente de frecuencia fundamental (60Hz), así como las componentes correspondientes a los armónicos generados: un noveno armónico (540 Hz) y un onceavo armónico (660 Hz), con lo cual se verificó que el sistema generó armónicos combinados de manera exitosa.

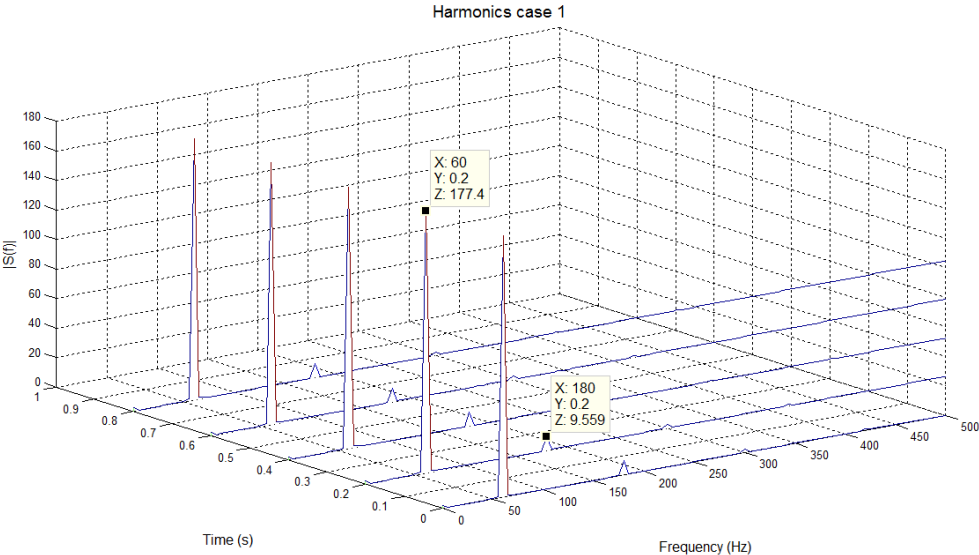


Figura 35. Análisis STFT, Armónicos caso 1

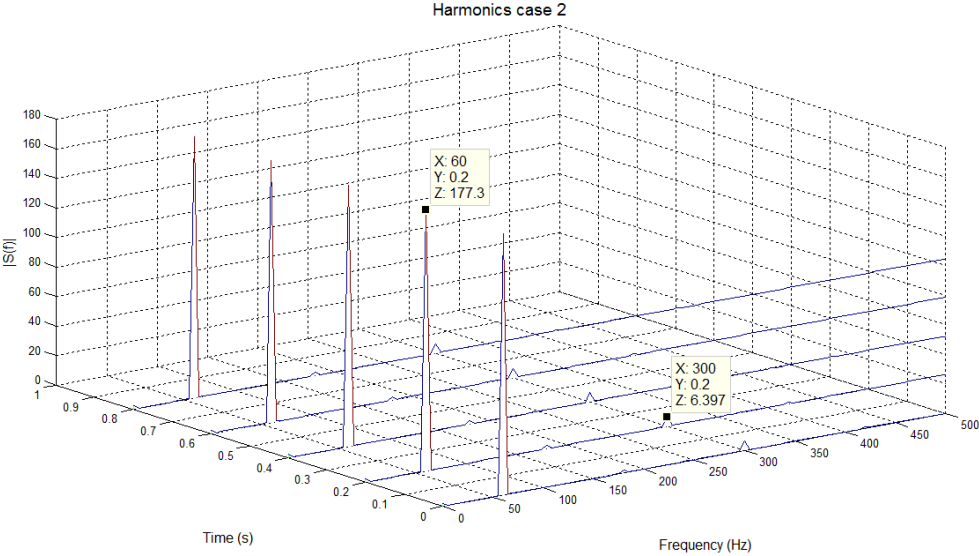


Figura 36. Análisis STFT, Armónicos caso 2

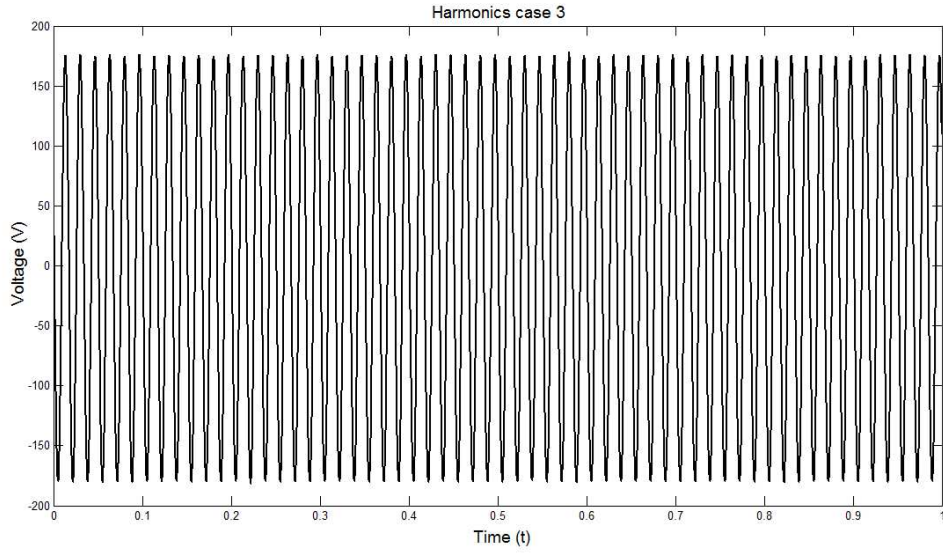


Figura 37. Forma de onda de voltaje armónicos combinados

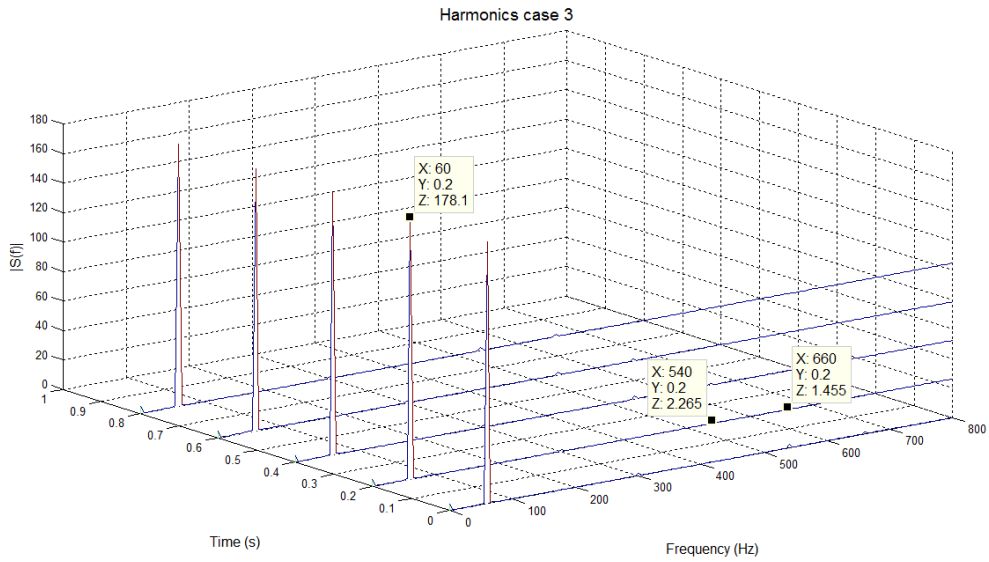


Figura 38. Análisis tiempo-frecuencia, armónicos caso 3

4.3.5 Notching

Las señales de voltaje en tiempo de los dos casos de estudio correspondientes a este disturbio se muestran en la Figura 39. El análisis tiempo-frecuencia para el caso 1 y el caso 2, son los presentados en la Figura 40 y la Figura 41, mismas en donde es posible observar la componente de frecuencia fundamental y así mismo, otras componentes en las frecuencias de generación fijadas en los casos de estudio para este disturbio.

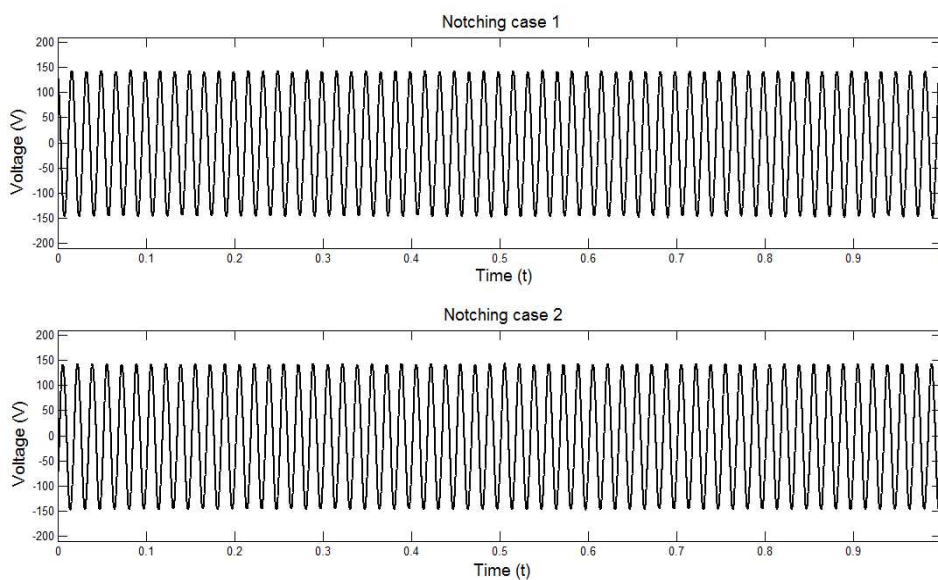


Figura 39. Señales de voltaje en tiempo notching

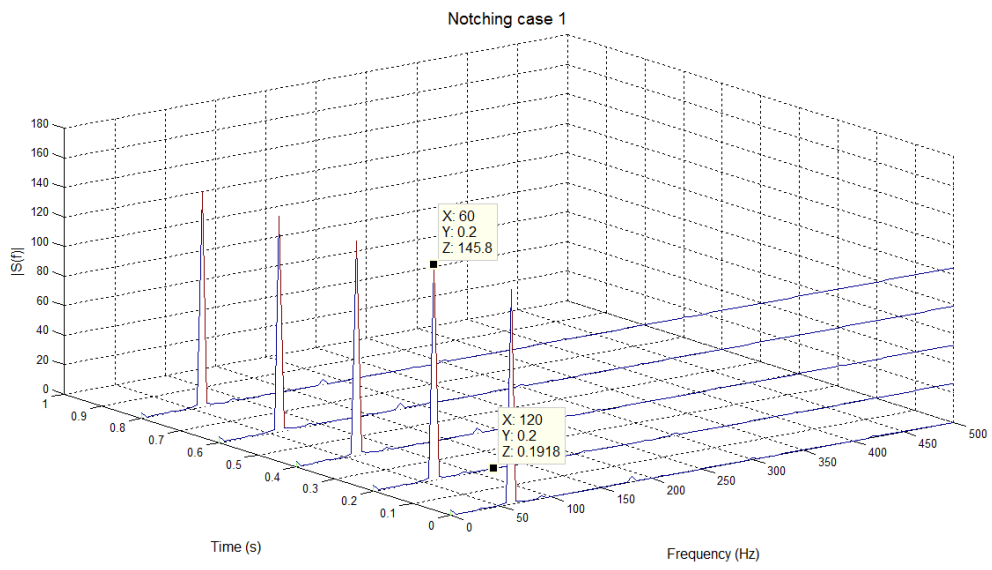


Figura 40. Análisis STFT, notching caso 1

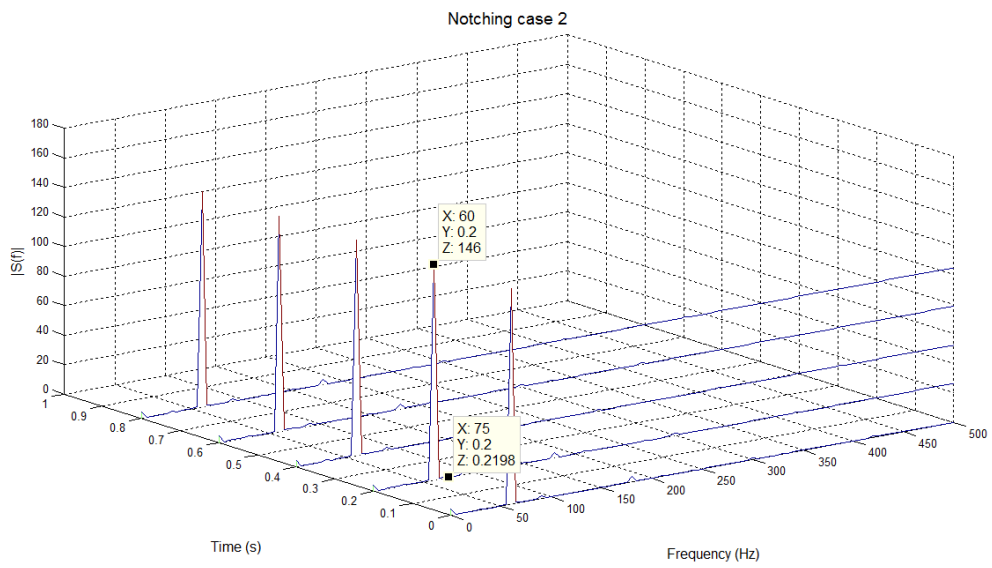


Figura 41. Análisis STFT, notching caso 2

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se diseñó, desarrolló e implemento un sistema de generación y monitoreo de disturbios de calidad de la energía, mediante inyección serie y síntesis digital de señales.

El sistema, a diferencia de trabajos ya reportados que funcionan como fuentes programables (generando señales de perturbaciones eléctricas que incluyen la forma de onda fundamental y el disturbio), el sistema inyecta solamente las formas de onda de los disturbios, con lo cual se aprovecha la potencia ya presente en la red de alimentación y con lo cual, los componentes utilizados no tienen exigencias de potencia elevadas. Así, la elevación que se realizó con un amplificador de audio comercial (económico en comparación a uno de voltaje) y la inyección un transformador de 13kVA proporcionan señales de disturbios con la potencia necesaria para la aplicación de interés.

Tanto el sistema de generación como el de monitoreo, están implementados utilizando tarjetas de diseño propio, con lo cual se deducen los costos por licencias a fabricantes o actualización de software.

El sintetizador de señales, debido a su estructura (basado en FPGA), tiene la cualidad de ser un sistema reconfigurable, dado que los cores implementados pueden ser modificados o rediseñados para atender las necesidades particulares de un sistema con el cual se requiera acoplar o para un proyecto en específico.

Para la validación de este diseño, se plantearon casos de estudio para seis de los disturbios más comunes: transitorio oscilatorio, SAG, SWELL, fluctuaciones, armónicos, notching, mismos que, como muestran los resultados, el sistema inyecta de forma exitosa en la fase de prueba del experimento, verificado en primera instancia por las formas de onda de voltaje obtenidas en la sección de adquisición, y en segunda instancia por el análisis tiempo-frecuencia con la Transformada Corta de Fourier (STFT). Con esto, el sistema es una herramienta auxiliar en la caracterización y análisis de los eventos de la Calidad de la Energía,

lo cual es vital para planear estrategias que permitan su prevención, mitigación y control.

Entre las prospectivas de este trabajo se encuentran, realizar las modificaciones necesarias (adición de elementos hardware principalmente) para que el sistema sea capaz de inyectar otros tipos de disturbios que también son mencionados en la norma, así como extender la posibilidad de personalización de los mismos agregando parámetros adicionales a las perturbaciones ya manejadas. Adicionalmente, queda como trabajo futuro la aplicación de otras técnicas de procesamiento de señales, de tal forma que sea posible, con un mismo sistema, la generación de disturbios eléctricos así como su validación y estudio; todo esto con el fin de que este sistema sea una herramienta auxiliar en el análisis de la Calidad de la Energía.

6. REFERENCIAS

ALSTOM. 2002. Network protection and automation guide. Llevallois-Perret.

Altera Corporation. 2013. FPGAs. <http://www.altera.com/products/fpga.html>

Álvarez P. 2009. Transformadores de distribución: teoría, cálculo, construcción y pruebas. Reverté.

Amezquita, J.P. 2012. Monitoreo de vibraciones en IR para detectar daños en estructuras. Universidad Autónoma de Querétaro Facultad de Ingeniería. Tesis Doctoral.

Bharat Heavy Electricals Limited. 2003. Transformers. Tata McGraw-Hill.

Bollen, M. and Gu I. 2006. Signal Processing of power quality disturbances. John Wiley & Sons, Inc.

Boylestand, Robert I. y Nashelsky L. 2003. Electrónica: Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos. Prentice Hall.

Cheng and J. Chen. 2011. Design of an arbitrary waveform signal generator. Procedia Engineering. 15:2500-2504.

Dugan, M.F. McGranaghan, S. Santoso and H.W. Beaty. 2003. Electrical power systems quality. McGraw Hill.

García, C. León, I. Monedero and J. Roper. 2007. A Precise Electrical Disturbance Generator for Neural Network Training with Real Level Output. Lectures Notes in Computer Science. Springer-Verlag.

Granados-Lieberman, D., R.A. Osornio-Rios, J.R. Rivera-Guillen, M. Trejo-Hernandez and R.J. Romero-Troncoso. 2013. Torque reduction and workpiece finishing effects due to voltage sags in turning processes. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture.

Granger, J. and Stevenson D. 1994. Power System Analysis. McGraw-Hill Series in Electrical and Computer Engineering.

Gu, Y.H. and H.J. Bollen. 2000. Time-frequency and time-scale domain analysis of voltage disturbances. IEEE Trans. Power Delivery. 15: 1279-1284.

Harris, F. 2007. Ultra Low Phase Noise DSP Oscillator [DSP Tips & Tricks]. IEEE, Signal Processing Magazine. 24: 121-124.

IEEE. 1995. IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.

Janik, P. and Lobos, T. 2006. Automated classification of power-quality disturbances using SVM and RBF networks. Power Delivery, IEEE Transactions on. 21: 1663-1669.

Kuon, J. 2008. FPGA Architecture: Survey and Challenges. Now Publishers.

Liu, Y.Y. Sheng and M.Q. Tan. 2013. Signal Generator based on the virtual instrument technology. Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 47: 974-978.

Mañana, C. 2007. Mitigation Technologies in a Distributed Environment. Springer. 20:15:40.

Montaño, C. León, A. García, A. López, I. Monedero and E. Personal. 2012. Random Generation of Arbitrary Waveforms for Emulating Three-Phase Systems. IEEE Transactions on industrial electronics. 59:4032-4040.

National Instruments Corporation. Software LabVIEW para el diseño de sistemas. <http://www.ni.com/labview/esa/>

National Instruments Corporation. NI FPGA. <http://www.ni.com/fpga/esa/>.

Pallás R. 2006. Instrumentos Electrónicos Básicos. Marcombo.

Penghui, Z. Lijie, B. Haijun and Z. Yanhua. 2010. Power Quality Monitoring of Power System Based on Spectrum Analysis. E-Product E-Service and E-Entertainment (ICEEE), 2010 International Conference on.

Rajkumar, N. Senthilnathan and T. Manigandan. 2012. Virtual Power Quality Monitoring using Laboratory Virtual Instrumentation Engineering

Workbench. International Conference on Computing and Control Engineering.

Reaz, F. Choong and F. Mohd-Yasin. 2006. VHDL Modeling for Classification of Power Quality Disturbance Employing Wavelet Transform, Artificial Neural Network and Fuzzy Logic. SIMULATION. 82:867-881.

Rocha y M. Madrigal. 2005. Análisis del Comportamiento en Controladores de Velocidad Variable durante Depresiones de Voltaje. IEEE Latin America Transactions. 3:415-422.

Romero-Troncoso R. de J. 2007. Electrónica Digital y Lógica Programable. Ed. Universidad de Guanajuato.

Romero-Troncoso and G. Espinosa-Flores. 1999. Phase accumulator synthesis algorithm for DDS applications. Electronic Letters. 35:770-772.

Serway. 2005. Electricidad y magnetismo. Cengage Learning Editores.

Standler R. 2002. Protection of electronic circuits from overvoltages. Pan American and International Copyright Conventions.

Stankovic L., M. Dakovic and T. Thayaparan. 2013. Time-Frequency Signal Analysis with Applications. ARTECH HOUSE.

Wen, C.H., H.Y. Hsu, H.Y. Ko and A. Y. Wu. 2004. Least squares approximation-based ROM-free direct digital frequency synthesizer. Circuits and Systems. Proceedings of the 2004 International Symposium on.

Whitaker J. 1999. AC Power Systems Handbook. CRC Press.

Wildi T. 2002. Electrical Machines, Drives, and Power Systems. Prentice Hall.

Zhang, L. Kaicheng and Y. Hu. 2010. A real-time classification method of power quality disturbances. Electric Power Systems Research. 81:660-666.

7. APÉNDICE

En esta sección se presentan los artículos de congreso publicados y que fueron el producto de este trabajo de tesis.

El primero publicado en el Congreso Nacional de Mecatrónica, Tecnologías de la información, Energías Renovables e Innovación Agrícola, CONAMTI 2014.

El segundo publicado en la Semana Nacional de Ingeniería Electrónica, SENIE 2014.



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE HUICHAPAN

Sistema Reconfigurable para Generación de Flicker por Medio de Inyección Serie y Síntesis Digital de Señales.

Claudia Gutiérrez Torres¹, René de Jesús Romero Troncoso², David Granados Lieberman³, Roque Alfredo Osornio Rios¹

¹ Maestría en Mecatrónica, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, ² CA Telemática/Procesamiento Digital de Señales, DICIS, Universidad de Guanajuato, ³ Electromecánica, Instituto Tecnológico Superior de Irapuato

Moctezuma 249, Col. San Cayetano, 76807, San Juan del Río, Querétaro, México, mina_park@live.com

Resumen— Las fluctuaciones de voltaje provocan perturbaciones conocidas como flicker, que son peligrosas debido al daño que provocan a equipos susceptibles a cambios de voltaje. En este trabajo se propone el diseño e implementación de un generador de flicker, mediante la inyección de componentes inter-armónicos a la línea de alimentación comercial mediante un transformador en serie. El sistema cuenta también con una interfaz gráfica de usuario para definir los parámetros del disturbio, una estructura digital basada en FPGA para la síntesis de señales y un amplificador de audio comercial. Por su arquitectura, el sistema es altamente configurable y de fácil integración con otros sistemas. Para la validación del mismo, se realizó el monitoreo de las señales de voltaje resultantes del sistema con un analizador de calidad de la energía, a través de la obtención de indicadores de los flickers generados, alimentando una luminaria incandescente, verificando el efecto visual indeseado de parpadeo ocasionado por este tipo de disturbios. Los resultados muestran que el sistema es eficiente en la generación de los disturbios y cumple los requerimientos de potencia necesarios para esta aplicación.

Abstract— Voltage fluctuations cause perturbations known as flicker, which are dangerous due the damage they can cause to equipment sensitive to voltage changes. In this work, the design and implementation of a flicker generator by injection with a series transformer is proposed. The system has also a graphic user interface to set the parameters of disturbance, a digital architecture based on FPGA for synthesizing signals and a commercial audio amplifier. Due its architecture, the system is highly configurable and easy to integrate with other systems. To validate the system, a monitoring of resulting voltage signals was done, with a power quality analyzer, through obtainment of indicators of generated flickers. Results show that the system is efficient in disturbances generation and satisfy the requirements of power needed for this application.

Palabras clave — FPGA, Calidad de la energía, Variaciones de voltaje.

I. INTRODUCCIÓN

Las fluctuaciones de voltaje y los flicker o parpadeos son perturbaciones en la magnitud de voltaje en los sistemas eléctricos y constituyen un aspecto importante relacionado a la calidad de la energía; las cuales, no solamente causan inestabilidad del sistema de iluminación y fatiga visual, sino que también afectan la operación normal de otros equipos

eléctricos susceptibles a variaciones en la amplitud de voltaje en el punto de acoplamiento común [1]. Ejemplos de equipo que producen flickers de voltaje son cargas como hornos de arco y máquinas de soldar, también generadores como turbinas de viento y plantas eléctricas de potencia [2]. En la actualidad, las fluctuaciones de voltaje y los flicker se han convertido en una amenaza para los usuarios de la energía eléctrica, debido a la repercusión en la maquinaria y equipo eléctrico, así como en paros de la producción en el sector industrial. Por lo que, es de gran utilidad, para los distintos sectores involucrados (productores de energía eléctrica grandes y pequeños, consumidores y fabricantes de maquinaria y equipo, entre otros), contar con sistemas que reproduzcan condiciones de alimentación, lo más reales posibles de estos tipos de disturbios eléctricos que permitan auxiliar en su análisis, entender la respuesta del sistema de potencia y sus efectos en diversos equipos, y así, proceder a su posterior detección y supresión.

Para la emulación de este disturbio diversos trabajos han sido reportados, como en [3] donde se diseña e implementa un generador de flicker para una fase, mediante un arreglo físico, que incluye un generador de señales en PC, amplificadores lineales y un transformador cuya salida es conectada directamente a las lámparas bajo prueba. La extensión a 3 fases de este trabajo, es presentada en [4] donde además se proponen pruebas en lámparas con propósitos educativos. De manera similar, en [5] es utilizada una PC, un DSP y un amplificador para generar formas de onda de la fundamental y componentes del flicker integrado, logrando la emulación de este disturbio. Aunque las propuestas anteriores, cumplen con emular el disturbio, éstos generan señales que incluyen la forma de onda completa (componente fundamental y la perturbación) que alimenta a las cargas bajo prueba, por lo que la potencia de los amplificadores y transformadores empleados en este tipo de arreglos debe satisfacer la demanda de potencia total de las lámparas alimentadas. En [6] se resuelve este problema, implementando una unidad generadora de SAG, SWELL y flicker, por medio de un arreglo físico que incluye un transformador en serie para la inyección o adición de componentes armónicas que caracterizan al disturbio eléctrico sobre una fuente de voltaje sin perturbaciones, las cuales son generadas por un arreglo de un



www.hidalgo.gob.mx

Dom. Conocido S/N, El Saucillo, Huichapan, Hgo., C.P. 42411

Tels.: 01 (761) 724 80 79 / 724 80 80

e-mail: iteshu@iteshu.edu.mx

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE HUICHAPAN

inversor de voltaje, sin embargo, esta propuesta implica un valor económico elevado debido a los componentes de estado sólido involucrados, así como las limitaciones en las componentes de frecuencia inyectadas debido a su principio de operación, además de que sólo se presenta la simulación del sistema. Cuando una emulación del disturbio en condiciones reales es requerida, surge la necesidad de contar con sistemas que generen las formas de onda con características tales como alta pureza espectral, sin contaminación indeseable, con anchos de banda apropiados y que cuente con arreglos físicos donde se aprovechen las potencias involucradas para proporcionar un bajo costo y capacidad de los componentes utilizados.

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, son amplificadas e inyectadas en la línea de alimentación comercial y así emular el disturbio de fluctuaciones de voltaje, cuyo efecto es conocido como flicker. Para ello, se desarrolló en Matlab una interfaz gráfica de usuario (GUI) encargada de recibir los parámetros de las formas de onda deseadas, además dicha interfaz genera los datos correspondientes a éstas y muestra una previsualización de las mismas (simulación). Adicionalmente, el sistema cuenta con una arquitectura digital, conformada por estructuras digitales (controladores de DAC, memoria RAM estática y protocolo de comunicación USB, y un sintetizador de señales) que tienen la función de almacenamiento y lectura de señales, y su síntesis de acuerdo a las especificaciones de amplitud, frecuencia y tiempo. Dicha estructura está basada en un arreglo de computas programables en campo (FPGA, *Field Programmable Gate Array*), dispositivo que permite el uso de diseños reconfigurables y el procesamiento en paralelo a velocidades muy altas. Finalmente, el sistema dispone de un amplificador de audio para la elevación de las señales a valores de la red, y un transformador para la inyección de éstas a una de las fases de la línea. Por su estructura, el sistema tiene las características de reconfigurabilidad y fácil integración con otros sistemas. Para la experimentación, se realizan diferentes casos de estudios de flicker generados de distintas características y probados en luminarios incandescentes, además se realiza un monitoreo de las señales con un analizador de calidad de la energía FLUKE y se presenta la evaluación de las formas de onda obtenidas mediante el indicador Pst del flicker, el cual mide la severidad del disturbio.

II. MODELADO DEL FLICKER DE VOLTAJE

Las fluctuaciones de voltaje son variaciones sistemáticas de la envolvente de voltaje o una serie de cambios aleatorios de éste; son la respuesta del sistema de potencia a la variación de la carga. Un flicker de luz es la respuesta del sistema de iluminación observada por el ojo humano [7].

Las fluctuaciones de voltaje están descritas como una modulación de amplitud del voltaje de frecuencia fundamental como se muestra en (1), donde V es el valor de la amplitud de la forma de onda de voltaje sin disturbio (la portadora), f_o la frecuencia fundamental, y $m(t)$ la modulación.

$$v(t) = V[1 + m(t)] \cos(2\pi f_o t) \quad (1)$$

Ahora bien, si se considera una señal de frecuencia fundamental modulada con una fluctuación de voltaje sinusoidal:

$$m(t) = M \cos(2\pi f_M t + \varphi_M) \quad (2)$$

Donde M es la amplitud de la moduladora, f_M su frecuencia y φ_M su fase, resulta en el siguiente voltaje fluctuante:

$$v(t) = V[1 + M \cos(2\pi f_M t + \varphi_M)] \cos(2\pi f_o t) \quad (3)$$

Lo cual puede ser escrito como la suma de tres formas senoidales o componentes frecuenciales:

$$v(t) = V \cos(2\pi f_o t) + \frac{1}{2} MV \cos[2\pi(f_o + f_M)t + \varphi_M] + \frac{1}{2} MV \cos[2\pi(f_o - f_M)t + \varphi_M] \quad (4)$$

El primer término en (4) es la onda portadora de frecuencia fundamental f_o y el segundo y tercer término corresponden a componentes de modulación del flicker [8]; por lo que las fluctuaciones de voltaje pueden ser obtenidas en el dominio de la frecuencia mediante la adición de componentes de frecuencia laterales a la componente fundamental. Entonces la ecuación (4) puede ser reescrita como la suma de la señal de voltaje sinusoidal pura más una señal $F(t)$ que corresponde a los dos últimos términos de esta ecuación.

$$v(t) = V \cos(2\pi f_o t) + F(t) \quad (5)$$

Por otra parte, para la evaluación de este tipo de disturbios, normas del IEEE 141 [9] y 519 [10], del IEC 61000-4-15 [11] y 61000-3-3 [12] y equipos de monitoreo de la calidad de la energía hacen referencia a índices particulares de la severidad de un flicker de corta duración Pst (durante 10 minutos) y de larga duración Plt (durante 2 horas) [13].

III. DESARROLLO DEL SISTEMA

De acuerdo a las características mencionadas en la introducción, el diagrama del sistema propuesto se muestra en la Fig. 1, el cual cuenta con un módulo software encargado de generar la señal $F(t)$ y enviarla al módulo hardware donde es almacenada y posteriormente enviada a un convertidor analógico-digital (DAC) para su conversión a señal de voltaje, misma que es amplificada y entonces inyectada a la línea de alimentación mediante un amplificador y un transformador

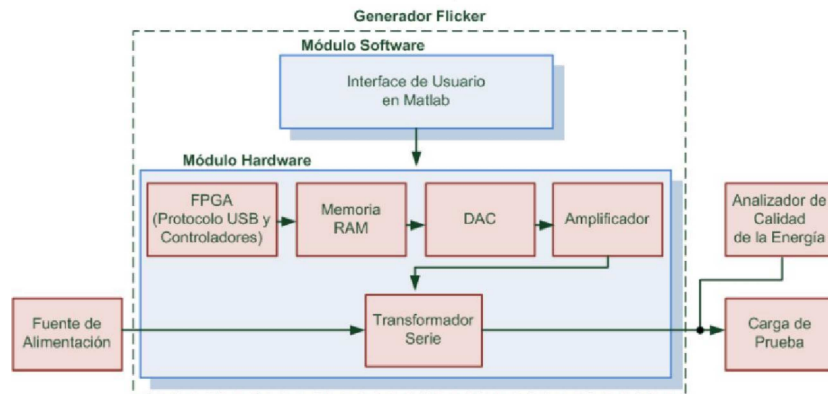


Fig. 1 Diagrama general del sistema

serie respectivamente; la forma de onda resultante (fundamental+disturbio) constituye la salida del sistema para la alimentación de una carga bajo prueba para la validación del mismo

A continuación, se presenta la descripción de los módulos software y hardware del sistema propuesto:

A. Módulo software

Consiste en una interfaz gráfica desarrollada en Matlab (Fig. 2), la cual le permite al sistema contar con una interacción amigable con el usuario. Sus funciones principales son:

- Establecer los parámetros del flicker, de la amplitud de las componentes y su frecuencia.
- Generación de los datos de la forma de onda $F(t)$ de acuerdo a (4).
- La visualización previa de la señal a generar y de la forma de onda final al inyectar el disturbio en la línea de alimentación o señal fundamental.
- El cálculo de las constantes requeridas por la estructura digital, la normalización de datos a niveles adecuados para el DAC y 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) 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 un sintetizador digital de señales (basado en la técnica de

Síntesis Digital Directa), además de estructuras auxiliares.

- 2) Memoria RAM estática (SRAM): Controlada por hardware (módulo digital), es utilizada para almacenar la información de la forma de onda a generar.
- 3) Convertidor digital analógico (DAC): Permite trasladar los datos digitales de 16 bits en señales analógicas con una amplitud máxima de 1.22V rms, correspondiente al máximo valor de voltaje recomendado para la entrada del amplificador.
- 4) Amplificador: Se trata de un amplificador comercial de audio de 650x2 W rms, modelo KAM-3465, marca MITZU, el cual se encarga de elevar el nivel de las señales de salida del DAC.
- 5) Transformador serie: Encargado del acoplamiento e inyección de la señal $F(t)$ en (5) a la señal de frecuencia fundamental de la línea, usando un par de devanados del transformador trifásico de 15 kVA, 440V/220-127V modelo SQ15T125H, marca Square D.

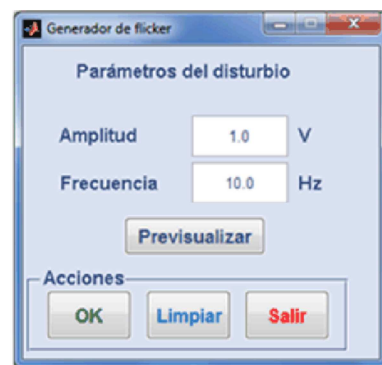


Fig. 2 Interfaz gráfica de usuario (GUI)

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE HUICHAPAN

IV. EXPERIMENTACIÓN Y CASOS DE ESTUDIO

La Fig. 3 muestra el banco de pruebas de la implementación de este sistema, de acuerdo al diagrama de la Fig. 1, con los componentes físicos requeridos: Una PC con la interfaz gráfica GUI, la tarjeta de desarrollo propia para la implementación de las estructuras digitales, un amplificador de audio, un transformador serie y una luminaria incandescente como carga.

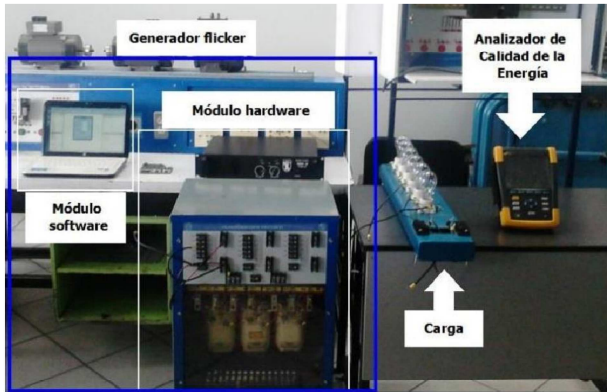


Fig. 3 Banco de pruebas del sistema.

Para la validación del funcionamiento del sistema (mediante la comprobación de formas de onda y obtención del índice de severidad del disturbio Pst), se consideran 8 casos de estudio (Tabla I) con diferentes parámetros de amplitud y frecuencia. Se realizó un monitoreo de los eventos, de 10 min para cada uno de los casos, con el analizador de calidad de la energía FLUKE, a través de las herramientas disponibles en éste.

TABLA I
CASOS DE ESTUDIO

Frecuencia (Hz)	Amplitud (Porcentaje de la nominal)	
	8%	16%
5	Caso 1	Caso 5
10	Caso 2	Caso 6
15	Caso 3	Caso 7
20	Caso 4	Caso 8

V. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados de la implementación del sistema y la validación del mismo a través de los casos de estudio, para lo cual se realizó el monitoreo de los eventos durante 10 minutos. Para la comprobación de las formas de onda y obtención del índice Pst, se utilizó el analizador de calidad de la energía FLUKE, y los datos obtenidos se visualizaron mediante el software Power Log el cual viene incluido con el dispositivo. La Fig. 4 muestra la

gráfica de uno de los eventos detectados por el analizador, correspondiente a la forma de onda resultante del flicker generado y en la cual se pueden observar las fluctuaciones en la señal de voltaje de alimentación.

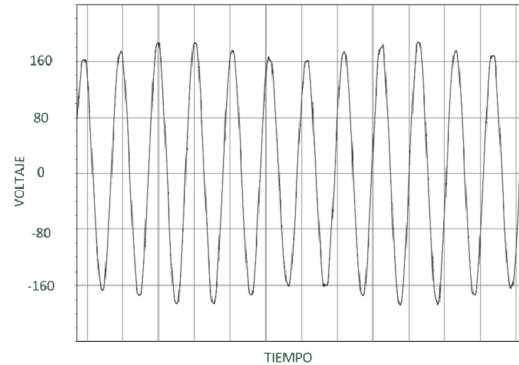


Fig. 4 Evento de onda de uno de los flicker generados.

Asimismo, en la Fig. 5 se muestra la gráfica de las variaciones en los valores RMS ocasionados por el flicker.

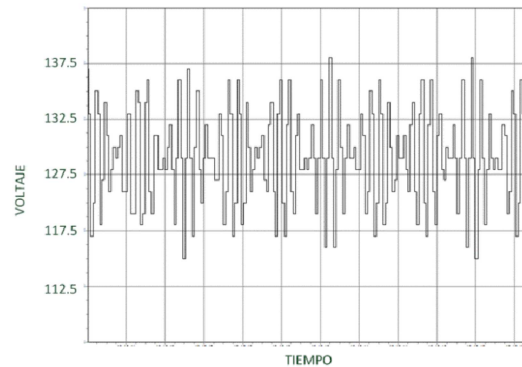
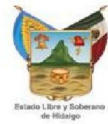


Fig. 5 Variaciones en los valores RMS.

La Tabla II muestra los resultados obtenidos para una amplitud de disturbio del 8% y 16% del valor nominal y valores de frecuencia que van de los 5 Hz a los 20 Hz, se reportan entonces los valores Pst para cada uno de los casos de estudio realizados.

TABLA III
ÍNDICE PST DE LOS CASOS DE ESTUDIO

Frecuencia (Hz)	Amplitud (Porcentaje de la nominal)	
	8%	16%
5	15.707	28.622
10	20.178	32.767
15	13.575	23.651
20	9.155	14.4



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE HUICHAPAN
VI. CONCLUSIONES

En este trabajo, se propone el diseño e implementación de un sistema software-hardware que permita la generación de la perturbación eléctrica conocida como flicker mediante la inyección de las componentes correspondientes al disturbio a una fuente de voltaje sin perturbaciones. El sistema propuesto cuenta con una GUI amigable con el usuario que permite la introducción de parámetros característicos del flicker. La estructura digital está basada 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 generar cualquier otro tipo de señales de interés. El amplificador y transformador utilizados son comerciales y cuentan con la ventaja de ser económicos sin sacrificar los requerimientos de potencia necesarios para una aplicación de este tipo.

Los resultados muestran que el sistema es capaz de inyectar disturbios en la línea eléctrica comercial del tipo flicker, logrando así, una emulación de condiciones reales de alimentación correspondientes a la calidad de la energía, lo cual es de suma importancia para la caracterización de estos disturbios, y para la realización de estudios futuros en la respuesta del sistema de potencia y en los efectos que producen éstos sobre diversas maquinarias y equipos, así como en la implementación de medidas de prevención y/o corrección.

RECONOCIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca de maestría con el número de CVU 488720.

Al Fondo de Investigación Científica Básica 2013 SEP-CONACyT por el apoyo al proyecto 22453.

REFERENCIAS

- [1] C. Qing, J. Xiufang and Z. Chengyong, "Analysis on Measuring Performance of Three Flicker Detecting Methods", in *PES '09*, 2009, paper ---, p. 1-7.
- [2] G.V. Axelberg, H.J. Bollen and I. Yu-Hua Gu, "Trace of Flicker Sources by Using the Quantity of Flicker Power", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, pp. 465-471, Jan.2008.
- [3] W.N. Chang and C.J. Wu, "Design and applications of a flicker voltage generator", in *Proc. EMPD '95*, 1995, paper --, p.128-133.
- [4] W.N. Chang and C.J. Wu, "A flexible voltage flicker teaching facility for electric power quality education", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 13, pp. 27-33.
- [5] V.B. Virulkar and M.V. Aware, "Power System Flicker Analysis, Modeling and Prototype Implementation", in *IECON 2012*, paper--, p. 5833-5839.
- [6] Y.H. Chung, G.H. Kwon, T. B. Park, H.J. Kim and J. I. Moon, "Voltage Sag, Swell and Flicker Generator with Series Injected Inverter", in *Power Engineering Society General Meeting*, 2005, paper--, p. 1308-1313.
- [7] *IEEE Recommended Practice for Monitoring Power Quality*, IEEE Std. 1159-1995.
- [8] H.J. Bollen and Y.H. Gu, *Signal Processing of Power Quality Disturbances*, 1st ed., Ed. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2006.

- [9] *IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants*, IEEE Std. 141-1993.
- [10] *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*, IEEE Std.519-1992.
- [11] *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4: Testing and measurement techniques – Section 15: Flickermeter – Functional and design specifications*, IEC 61000-4-15.
- [12] *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3: Limits – Section 3: Limitation of voltage fluctuations and flicker in low-voltage supply systems for equipment with rated current ≤16 A*, IEC 61000-3-3.
- [13] T.A. Short, *Distribution Reliability and Power Quality*, 1st ed., Ed. Taylor & Francis, 2006.



www.hidalgo.gob.mx

Dom. Conocido S/N, El Saucillo, Huichapan, Hgo., C.P. 42411

Tels.: 01 (761) 724 80 79 / 724 80 80

e-mail: iteshu@iteshu.edu.mx

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.

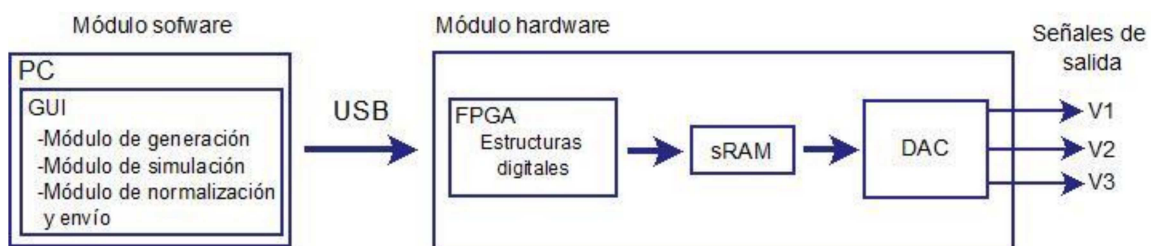


Fig. 1. Diagrama general del sistema.

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

$\varphi_i, \varphi_h =$ fase del disturbio, fase del armónico

Disturbio	Modelo matemático
Transitorio oscilatorio	$v(t) = A_n \cos(2\pi f_o t) + A_i \cos(2\pi f_i t + \varphi_i) e^{-at}$
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	$v(t) = A_n \cos(2\pi f_o t) + A_i [\cos(2\pi f_i t)]$

Tabla 1. Modelos matemáticos de los disturbios.

- 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].

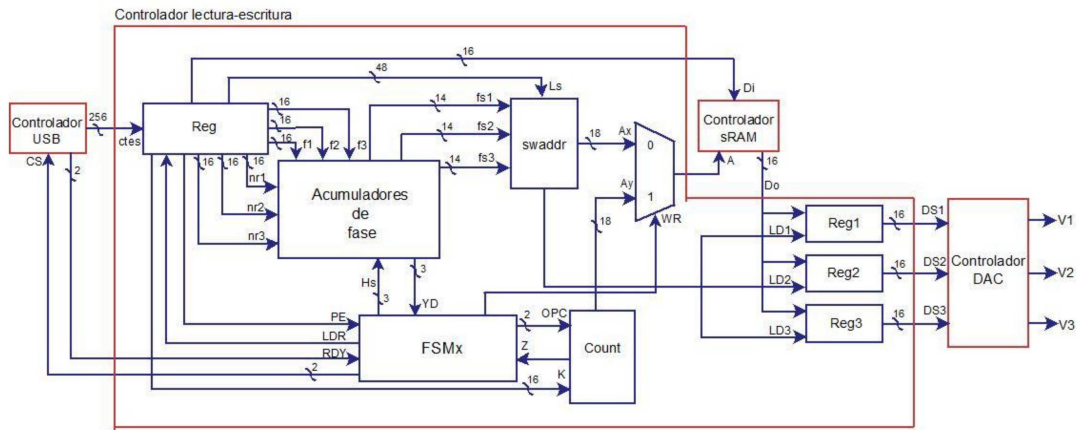


Fig. 2. Estructura digital del sistema.

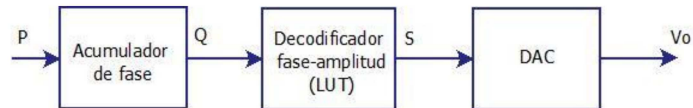


Fig. 3. Esquema básico de un sintetizador de formas de onda.

- 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.

Caso de estudio	Modelo matemático	Parámetros de prueba
Transitorio oscilatorio	$f(t) = A_i \cos(2\pi f_i t + \varphi) e^{-at}$	$A_i = 2V, f_i = 10Hz, \varphi = 0,$ $a = 2.5, t_1 = 0.05s, t_2 = 0.25s$
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	$f(t) = A_i [\cos(2\pi f_i t)]$	$A_i = 3V, f_i = 35Hz$

Tabla 2. Casos de estudio.

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).

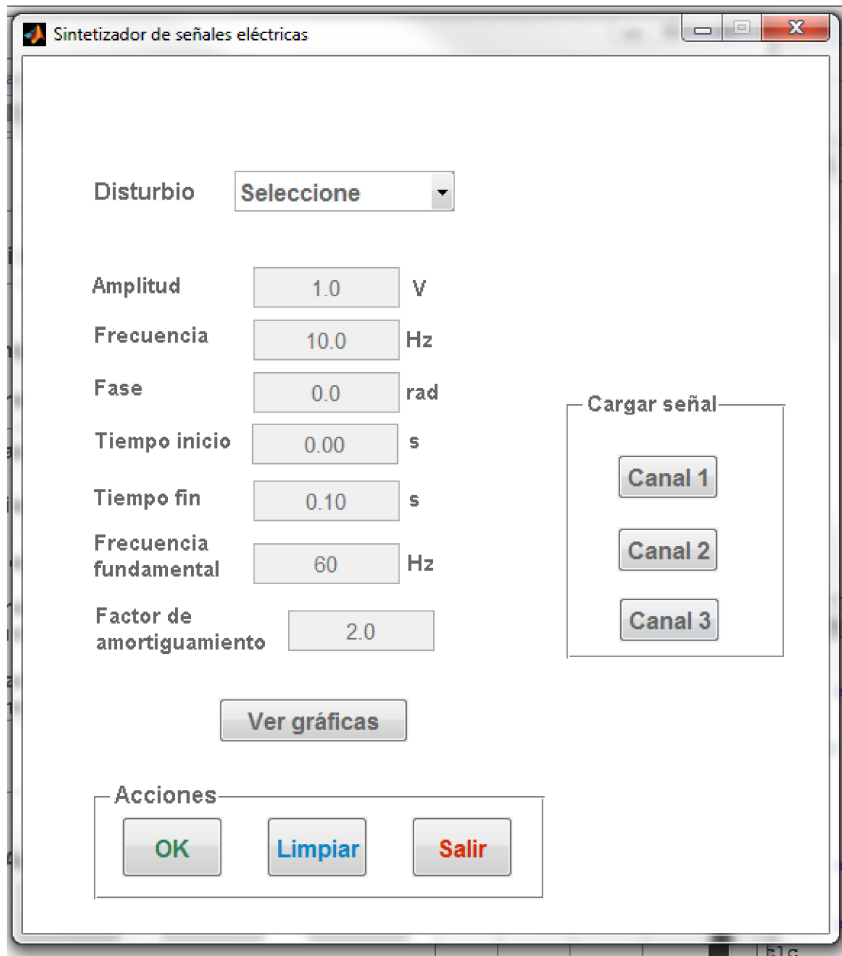


Fig. 5. Interfaz gráfica de usuario.

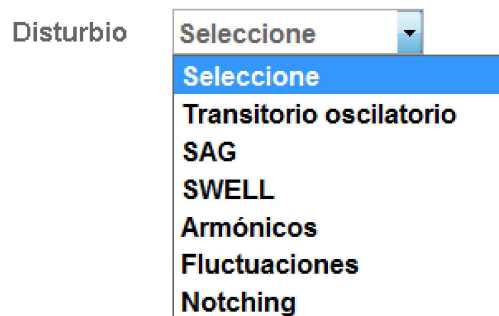


Fig. 6. Menú de formas de onda disponibles.

- 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.

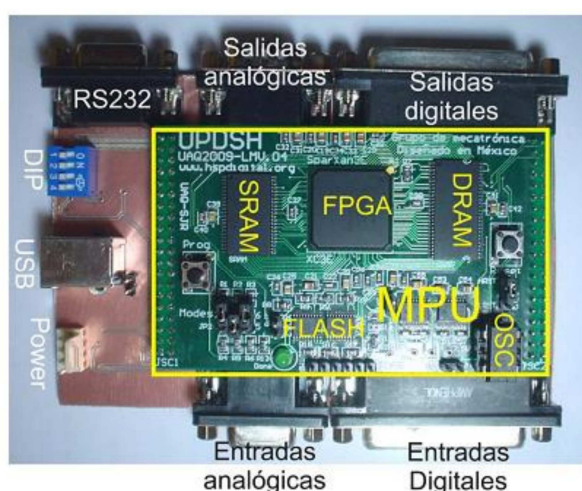


Fig. 7. Tarjeta PLC-UAQ.

- 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.

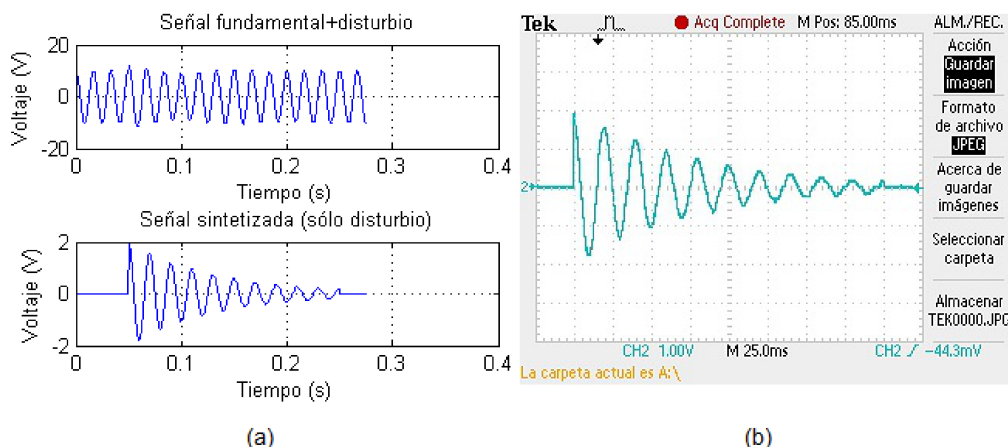


Fig. 8. Transitorio oscilatorio: (a) Simulación, (b) Señal física analógica.

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).

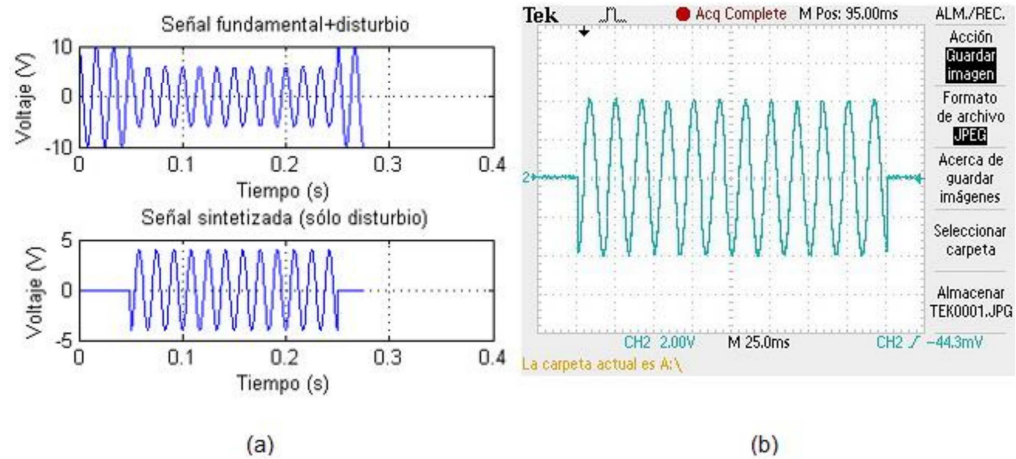


Fig. 9. SAG: (a) Simulación, (b) Señal física analógica.

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)).

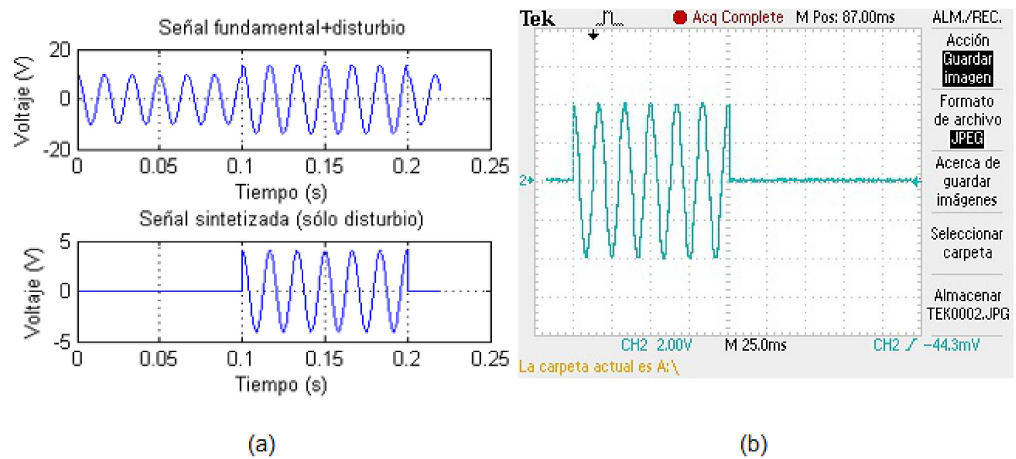


Fig. 10. SWELL: (a) Simulación, (b) Señal física analógica.

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

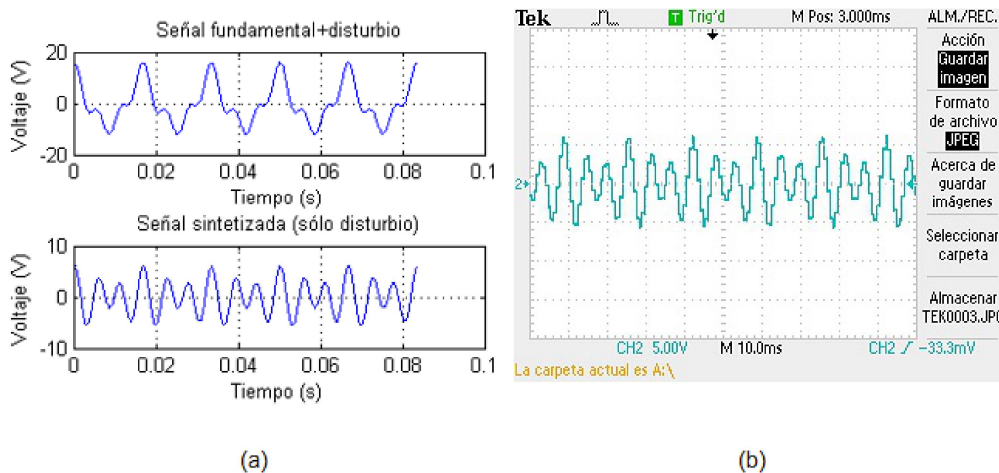


Fig. 11. Armónicos: (a) Simulación, (b) Señal física analógica.

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)).

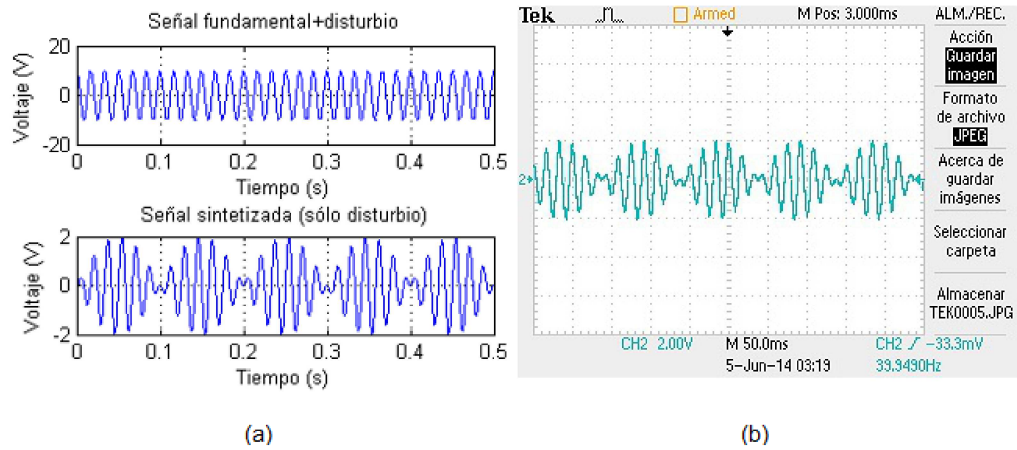


Fig. 12. Fluctuaciones: (a) Simulación, (b) Señal física analógica.

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)).

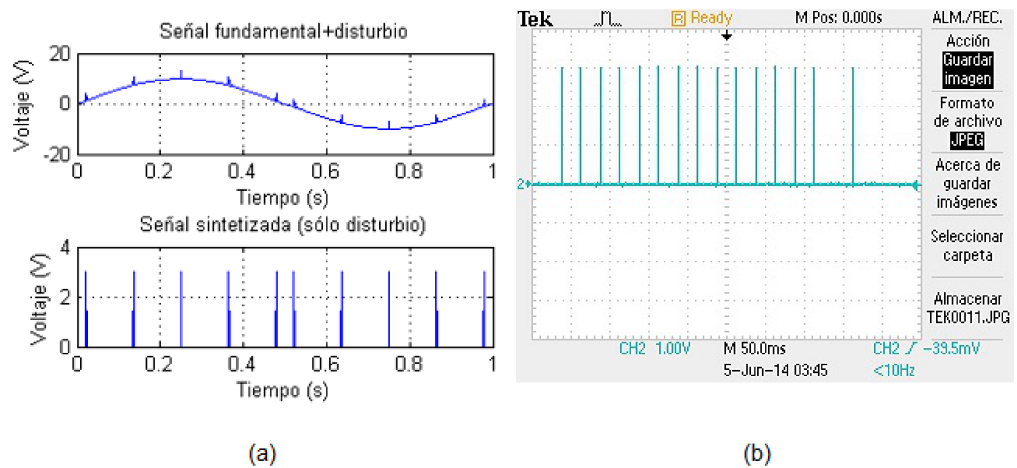


Fig. 13. Notching: (a) Simulación, (b) Señal física analógica.

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 perspectivas 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. 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.