

# HUMANIDADES, CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN EN PUEBLA

ACADEMIA JOURNALS



OPUS PRO SCIENTIA ET STUDIUM

ISSN 2644-0903 online

VOL. 2, NO. 1, 2020

[WWW.ACADEMIAJOURNALS.COM](http://WWW.ACADEMIAJOURNALS.COM)

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN AUSPICIADO POR EL CONVENIO CONCYTEP-ACADEMIA JOURNALS



SALOMÓN NOÉ TURIJÁN ALTAMIRANO

SISTEMA DE DETECCIÓN Y MONITOREO DE CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PUEBLA

PRESIDENTE: DR. GERMÁN ARDUL MUÑOZ HERNÁNDEZ

SECRETARIO: DR. JESÚS CHÁVEZ GALÁN

VOCAL: M.C. VICENTE RAMÍREZ PALACIOS

NÚMERO DE SECUENCIA 2-15



**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO**

---

---

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PUEBLA**

**“SISTEMA DE DETECCIÓN Y MONITOREO DE  
CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA”**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**PRESENTA:**

**ING. SALOMÓN NOÉ TURIJÁN ALTAMIRANO**

**JURADO:**

**PRESIDENTE:**

**DR. GERMÁN ARDUL MUÑOZ HERNÁNDEZ**

**SECRETARIO:**

**DR. JESÚS CHÁVEZ GALÁN**

**VOCAL:**

**M.C. VICENTE RAMÍREZ PALACIOS**

**PUEBLA, PUE.**

**NOVIEMBRE 2019**

## **RESUMEN**

### **“Sistema de detección y monitoreo de calidad de la energía eléctrica”**

**Salomón Noé Turiján Altamirano**

El presente documento muestra el desarrollo del proyecto de tesis “Sistema de detección y monitoreo de calidad de la energía eléctrica” llevado a cabo en Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Puebla, para obtener el grado de Maestría en Ingeniería Electrónica en la línea de generación y/o aplicación de conocimiento de Modelado y Control de Sistemas de Energía.

Se ofrece un panorama acerca de los principales fenómenos que alteran la calidad de la energía eléctrica y la importancia del monitoreo.

Se describe la implementación de una plataforma, basada en un sistema embebido, teniendo como núcleo un FPGA Spartan 6, para el monitoreo de disturbios presentes en la red eléctrica, como la detección de crestas y valles de tensión, además de la medición de los primeros 31 armónicos de la señal de entrada, con base en el estándar IEEE 1159-2009.

Se aborda la construcción del prototipo a nivel hardware y la integración de algoritmos para el cálculo del valor RMS, la transformada rápida de Fourier y la detección de alteraciones presentes en la onda.

Por último, se presentan los resultados obtenidos a partir de las pruebas realizadas con el dispositivo en funcionamiento.

## **ABSTRACT**

### **"System of detection and monitoring of quality of electric energy"**

**Salomón Noé Turiján Altamirano**

The present document shows the development of the thesis project "System of detection and monitoring of quality of electric energy" carried out at Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Puebla, to obtain the Master's Degree in Electronic Engineering in the line of generation and / or application of knowledge of Modeling and Control of Energy Systems.

An overview is given about the main phenomena that alter the quality of electrical energy and the importance of monitoring.

It describes the implementation of a platform, based on an embedded system, having as core a Spartan 6 FPGA, for the monitoring of disturbances present in the electrical network, such as the detection of voltage sag and swell, in addition to the measurement of the first 31 harmonics of the input signal, based on the IEEE 1159-2009 standard.

The construction of the prototype at hardware level and the integration of algorithms for the calculation of the RMS value, the fast Fourier transformation and the detection of alterations present in the wave are addressed.

Finally, the results obtained from the tests performed with the device in operation are presented.

# ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	i
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	iii
OBJETIVO GENERAL.....	iv
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	iv
JUSTIFICACIÓN .....	v
ALCANCES Y LIMITACIONES.....	vi
ANTECEDENTES .....	vii
CAPÍTULO I. CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA.....	1
1.1 CLASIFICACIÓN DE DISTURBIOS .....	3
1.1.1 Transitorios.....	3
1.1.1.1 Transitorio impulsivo.....	4
1.1.1.2 Transitorios oscilatorios .....	5
1.1.1.3 Efectos .....	6
1.1.2 Variaciones de corta duración.....	6
1.1.2.1 Interrupciones momentáneas y temporales.....	7
1.1.2.2 Sags.....	8
1.1.2.3 Swells.....	11
1.1.3 Variaciones de larga duración .....	12
1.1.3.1 Sobrevoltaje .....	12
1.1.4 Armónicos .....	12
1.2 MONITOREO DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA.....	13
1.2.1 Instrumentos de monitoreo .....	14
1.2.2 Clasificación de instrumentos .....	15
1.2.2.1 Indicadores de eventos .....	15
1.2.2.2 Osciloscopio .....	15
1.3 CONTRIBUCIÓN A LA LITERATURA PUBLICADA.....	16
CAPÍTULO II. ARQUITECTURA DE LA PLATAFORMA .....	17
2.1 PROCESAMIENTO .....	18
2.2 CONVERTIDOR ANALÓGICO DIGITAL .....	21

2.3 DESPLIEGUE DE RESULTADOS .....	24
2.3.1 Modo básico .....	24
2.3.2 Modo gráfico .....	25
2.3.3 Modo de conexión a la PC.....	26
2.4 ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL .....	27
2.5 DISEÑO DE CARCASA .....	28
CAPÍTULO III. DISEÑO Y SIMULACIÓN DE ALGORITMOS.....	29
3.1 ESCALAMIENTO DE FRECUENCIA .....	29
3.2 ADQUISICIÓN DE DATOS .....	31
3.2.1 Muestreo .....	31
3.2.2 Convertidor analógico-digital.....	33
3.3 VALOR DE LA RAÍZ DE LA MEDIA CUADRÁTICA (RMS) .....	35
3.4 DETECCIÓN DE EVENTOS.....	38
3.5 MEDICIÓN DE ARMÓNICOS.....	39
3.6 GENERACIÓN DE REPORTE .....	42
3.6.1 Reporte básico.....	44
3.6.2 Reporte gráfico.....	46
3.6.3 Interfaz de comunicación .....	49
CAPÍTULO IV. PRUEBAS Y RESULTADOS .....	51
4.1 DESCRIPCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS .....	51
4.1 Equipo para mediciones .....	51
4.1.1 Multímetro .....	51
4.1.2 Generador de funciones.....	52
4.1.3 Osciloscopio digital.....	53
4.2 SEÑALES DE TIEMPO .....	54
4.2.1 Pulsos de reloj .....	54
4.2.2 Reloj de 24 horas.....	54
4.3 MEDICIÓN DE VOLTAJE .....	55
4.4 MEDICIÓN DE VALOR RMS .....	57
4.5 GRÁFICO DE FORMA DE ONDA .....	58
4.6 DETECCIÓN DE EVENTOS.....	60
4.7 MEDICIÓN DE ARMÓNICOS.....	61

CONCLUSIONES .....	64
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	66
ANEXOS .....	68
Anexo A. Certificado de publicación de artículo .....	68

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Transitorio impulsivo causado por un rayo.....	5
Figura 2. Transitorio oscilatorio .....	6
Figura 3. Interrupción momentánea y subsecuente reincorporación .....	7
Figura 4. Sag de voltaje instantáneo .....	8
Figura 5. Sag temporal causado por el arranque de un motor .....	9
Figura 6. Ejemplo de swell de voltaje.....	11
Figura 7. Ejemplo de señal con distorsión armónica y sus componentes.....	13
Figura 8. Esquema de la plataforma de monitoreo de calidad de la energía eléctrica.....	17
Figura 9. Tarjeta de desarrollo ASSERTA .....	18
Figura 10. Diagrama a bloques de tarjeta ASSERTA.....	19
Figura 11. Interfaz de software INTegra v1.0.....	19
Figura 12. Convertidor AD7265.....	21
Figura 13. Esquema del convertidor AD7265.....	22
Figura 14. Conectores para las entradas del convertidor .....	23
Figura 15. Adecuación de conexión SMA a BNC .....	24
Figura 16. Indicadores para el modo básico .....	25
Figura 17. Display de cristal líquido de 3.2 pulgadas .....	25
Figura 18. Puerto USB para comunicación con la computadora.....	26
Figura 19. Señal original por medir y señal requerida .....	27
Figura 20. Circuito de adecuación de señal.....	27
Figura 21. Carcasa para la plataforma.....	28
Figura 22. Prototipo ensamblado.....	28
Figura 23. Arquitectura de software para monitor de calidad de la energía.....	29
Figura 24. Algoritmo para escalamiento de señal de reloj .....	30
Figura 25. Simulación de escalamiento de frecuencia .....	31
Figura 26. Ciclo completo de la onda senoidal con $f=60$ Hz, $T=16.66$ mS.....	32
Figura 27. Diagrama de tiempo de comunicación del ADC.....	33
Figura 28. Diagrama de flujo para adquisición de datos.....	34
Figura 29. Diagrama de tiempo para adquisición de datos .....	35
Figura 30. Diagrama de flujo para obtener el valor RMS .....	36
Figura 31. Simulación del algoritmo para obtener valor rms.....	37
Figura 32. Diagrama de tiempo del cálculo del valor rms.....	37
Figura 33. Diagrama de flujo de algoritmo para detección de eventos.....	38
Figura 34. Diagrama de tiempo del bloque para detección de eventos .....	39
Figura 35. Diagrama de flujo de algoritmo para cálculo de armónicos .....	41
Figura 36. Simulación de algoritmo para cálculo de armónicos .....	42
Figura 37. Modalidades de reporte de resultados.....	43
Figura 38. Diagrama de flujo para reporte básico de eventos.....	44
Figura 39. Indicadores de tipo de evento .....	45

Figura 40. Configuraciones para presentar datos de un evento ocurrido .....	46
Figura 41. Esquema de opciones de despliegue gráfico de resultados .....	47
Figura 42. Pantalla de opción “osciloscopio” .....	47
Figura 43. Pantalla en opción de “historial de eventos” .....	48
Figura 44. Pantalla de opción de “espectro de armónicos” .....	48
Figura 45. Pantalla de opción de “tabla de armónicos” .....	49
Figura 46. Comunicación entre monitor de calidad de la energía y una PC .....	49
Figura 47. Secuencia para envío de datos.....	50
Figura 48. Esquema de plataforma experimental.....	51
Figura 49. Multímetro .....	52
Figura 50. Generador de funciones Wave Station 2022 .....	53
Figura 51. Osciloscopio Tektronix TBS1102B/EDU.....	53
Figura 52. Señal de reloj escalada .....	54
Figura 53. Esquema de configuración para prueba de reloj de 24 hrs. ....	54
Figura 54. Sincronización de reloj de 24 hrs .....	55
Figura 55. Esquema de configuración para prueba de adquisición con adc.....	55
Figura 56. Comparación de lectura de voltaje con el prototipo y voltímetro.....	56
Figura 57. Lectura de voltaje inicial y corregida.....	56
Figura 58. Esquema de configuración para prueba de valor rms .....	57
Figura 59. Lectura de valor rms en prototipo, voltímetro y osciloscopio .....	57
Figura 60. Esquema de configuración para prueba de gráfico de forma de onda.....	58
Figura 61. Formas de onda graficadas en pantalla del prototipo .....	59
Figura 62. Formas de onda graficadas en la interfaz de computadora.....	59
Figura 63. Deformación del gráfico de la onda por elevada frecuencia .....	59
Figura 64. Esquema de configuración para prueba de detección de eventos .....	60
Figura 65. Reporte de evento detectado modo básico.....	60
Figura 66. Historial de eventos detectados modo gráfico .....	61
Figura 67. Gráfico de valor rms en reporte modo comunicación .....	61
Figura 68. Esquema de configuración para prueba de medición de armónicos.....	62
Figura 69. Espectro de armónicos en pantalla del prototipo.....	62
Figura 70. Espectro de armónicos en interfaz de computadora .....	62
Figura 71. FFT de osciloscopio.....	63
Figura 72. Tabla de magnitud de armónicos.....	63

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los principales fenómenos que afectan la calidad de la energía .....	2
Tabla 2. Parámetros de disturbios .....	2
Tabla 3. Principales causas de transitorios .....	4
Tabla 4. Características principales FPGA Spartan 6 .....	20
Tabla 5. Conexiones entre FPGA Y AD7265.....	21
Tabla 6. Terminales del convertidor AD7265.....	23
Tabla 7. Características de la señal de reloj .....	30
Tabla 8. Prestaciones en las tres modalidades .....	43
Tabla 9. Pruebas de gráfico de forma de onda .....	58

## INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica es ocupada en diferentes ámbitos, a nivel doméstico es utilizada para hacer funcionar aparatos electrodomésticos, alimentar luminarias, televisores, cargadores de celular, entre otros, y si hablamos a nivel industrial es necesaria para activar máquinas y equipos en talleres y laboratorios, así como para energizar procesos industriales completos, por lo que podemos darnos cuenta de lo indispensable de este recurso.

Al ser un insumo de tal importancia, se desea obtener el mejor aprovechamiento para optimizar su consumo. Un punto clave que se debe tomar en cuenta es la calidad de la energía eléctrica que se refiere a la cantidad de distorsión de la señal que idealmente corresponde a una onda senoidal con amplitud, frecuencia y fase constante.

Parte de las perturbaciones que se tienen en la señal eléctrica son inherentes al proceso de distribución desde la central eléctrica que se encarga de proveer el recurso, por lo que en el diseño de los aparatos, equipos o máquinas se debe tomar en cuenta una tolerancia para estos defectos. Por otra parte, los fenómenos que afectan la calidad de la energía también pueden ser causados o amplificadas por el modo en que se trabaja con ésta, desde el uso de máquinas eléctricas con cargas inductivas y de manera general cualquier carga no lineal también tiende a afectar el suministro. Irónicamente, la tecnología electrónica, en su mayor parte, tiene un comportamiento no lineal por lo que al aumentar el uso de dispositivos con estos componentes se va aumentando la deformación de la línea de alimentación eléctrica.

Por lo anterior, es considerable contemplar opciones de tecnología para poder medir la calidad de la energía eléctrica. En este documento se muestra el resultado de la investigación para el desarrollo de una plataforma capaz de cuantificar los eventos que se presenten en la señal, para permitir a los usuarios hacer una aproximación a las causas de estas perturbaciones.

En el capítulo 1 se muestra la fundamentación teórica de la investigación, partiendo de los conceptos básicos para abordar el tema de calidad de la energía, con una clasificación de los disturbios que alteran al suministro eléctrico.

En el capítulo 2 se describen los componentes electrónicos que conforman la plataforma, detallando sus principales características y la función en la que intervienen para el funcionamiento del sistema.

El capítulo 3 contiene la implementación de los algoritmos para el cálculo de parámetros como el valor eficaz, la obtención de armónicos por medio de la transformada rápida de Fourier, la detección de eventos y el despliegue de la información obtenida. También se muestra el resultado de las simulaciones para verificar su funcionamiento.

Por último, los resultados de la integración y puesta en marcha del sistema, se abordan en el capítulo 4, a través de la realización de una serie de pruebas, estudiando los valores obtenidos y comparándolos con instrumentos de medición comerciales.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Los aparatos que funcionan con energía eléctrica tienen un rango de sensibilidad determinado para trabajar con perturbaciones en el suministro. Al exceder este límite las máquinas pueden comenzar a sufrir alteraciones que muchas veces pueden ser imperceptibles a los usuarios, pero que con una larga exposición afecta en la vida útil del aparato.

Esta serie de disturbios ha sido estudiada a lo largo del tiempo, estableciendo una clasificación y los parámetros que definen a cada evento, creando una normatividad que sirva de guía de referencia para las investigaciones que se realicen en este campo (Robledo Leal, 2008).

Los fenómenos que alteran la calidad de la energía pueden tener una duración muy corta por lo que cuantificarlos o incluso captarlos es un proceso difícil que no se podría conseguir con equipo básico (IEEE Power & Energy Society, 2009), por lo que el problema a abordar es ¿cómo diseñar, implementar y programar una plataforma para medir la calidad de la energía con base en la normatividad vigente?

## **OBJETIVO GENERAL**

Diseñar, implementar y programar una plataforma para el monitoreo de la calidad de la energía eléctrica en el laboratorio de manufactura del Instituto Tecnológico de Puebla con base en el estándar IEEE 1159-2009 y la norma IEC 61000-4-30:2015 para reconocer las perturbaciones que se presentan.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Investigar y comprender las perturbaciones de la calidad de la energía.

Investigar normatividad para medición de la calidad de la energía.

Comparar prestaciones de hardware para adquisición de datos

Comparar prestaciones de hardware para procesamiento de señales.

Diseñar los algoritmos para detección de subidas y caídas de voltaje.

Diseñar los algoritmos para medición de armónicos.

Realizar pruebas fuera de línea con datos reales adquiridos previamente.

Implementar la plataforma y probarla con señales adquiridas en tiempo real.

## JUSTIFICACIÓN

Las máquinas y equipos que se utilizan en talleres, laboratorios o industrias tienden a incorporar circuitos electrónicos que, por la naturaleza de su funcionamiento, provocan disturbios en el suministro eléctrico, si a esto agregamos que en la actualidad ha aumentado el uso de aparatos con tecnología electrónica, entonces cada vez aumentan los defectos que porta la línea eléctrica.

Estos mismos aparatos han sido diseñados para funcionar con cierta cantidad de distorsión en el suministro eléctrico, sin embargo, en caso de sobrepasar esta tolerancia se está afectando el rendimiento en los procesos que realiza.

El contar con un instrumento que permita generar un historial de los eventos que se presentan, aportaría información a los usuarios que les permitiría determinar los horarios y así deducir las máquinas que están causando esas afectaciones (Jiménez & Cerro).

En la división de estudios de posgrado e investigación del Instituto Tecnológico de Puebla se trabaja en aplicaciones en donde intervienen generadores o incluso convertidores que, en algunos casos, manejan corriente alterna. El desarrollo de esta plataforma puede aportar una herramienta para que los investigadores hagan una revisión de la calidad de la energía que interviene en sus procesos.

Este proyecto puede sentar la base para próximas investigaciones en las que se podría continuar con la determinación específica de la causa de los defectos en la señal o también pensar en un diseño comercial para la plataforma.

## **ALCANCES Y LIMITACIONES**

La plataforma será implementada a nivel prototipo, respetando el estándar IEEE 1159-2009 y la norma IEC 61000-4-30:2015, con la capacidad de detectar crestas (swell) y valles (sag) de voltaje, además de medir hasta el armónico número 31 (IEEE Power & Energy Society, 2009).

Para la fase de experimentación, se implementará un banco de pruebas con un ambiente controlado equipado con dispositivos que puedan causar defectos en el suministro que estará aislado de la red eléctrica principal para evitar la existencia de demasiadas fuentes de distorsión de calidad de la energía.

En cuanto a hardware, se emplearán tarjetas de desarrollo comerciales que cuenten con capacidades de adquisición de datos y procesamiento de señales, sólo se realizará la integración de estas tecnologías.

De igual manera se utilizarán puntas de prueba comerciales, por lo que se estará limitado a la calidad de éstas para no producir alteraciones en la medición.

La adquisición del equipo y dispositivos requeridos para este proyecto dependerá de los recursos otorgados por el Departamento de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Puebla.

## ANTECEDENTES

En los últimos años, se han llevado a cabo diferentes trabajos de investigación en lo que se refiere al diseño de plataformas para el monitoreo de calidad de la energía eléctrica. Cada uno de ellos aborda objetivos específicos a cubrir, en cuanto a los eventos que serán detectados, empleando diversas tecnologías y metodologías para su funcionamiento. De la documentación referente a estos proyectos, se toman en cuenta los trabajos más destacados, para partir de una base en la realización de este proyecto.

En 2005 (Ángel Silva & Ordóñez Plata, 2005) se desarrolla un equipo para detectar interrupciones y caídas de tensión para monitorear la calidad de energía del suministro eléctrico. Se revisa el diseño y su construcción, desde la etapa de adquisición de datos hasta el despliegue de resultados a través de una interfaz gráfica en la computadora desde la que también permite modificar algunos parámetros.

La plataforma (Ángel Silva & Ordóñez Plata, 2005) está basada en un microcontrolador PIC16F876 encargado del procesamiento de las señales, un rectificado de onda con un puente de diodos para el acondicionamiento de la señal, el circuito MAX232 para la comunicación con la computadora y la interfaz es programada en Visual Basic.

El dispositivo (Ángel Silva & Ordóñez Plata, 2005) consigue la detección de dos eventos satisfactoriamente con un margen de error aceptable, sin embargo, pierde información cuando se acerca a niveles de voltaje pequeños, debido a la pérdida de datos en la zona de activación de los diodos.

En el año 2011 (Pinzón, Useche, & Rodríguez, 2011) se elabora un equipo capaz de detectar los fenómenos electromagnéticos de sag, swell, flicker y armónicos a través de una microcomputadora encargada del procesamiento de la información. La adquisición de datos se realiza por medio del componente DAS 6036 de Measurement Computing.

La parte fundamental es la tarjeta VIA epia-ms (Pinzón, Useche, & Rodríguez, 2011), una plataforma de bajo perfil que cuenta con todos los recursos necesarios para ejecutar un sistema operativo Windows o Linux. Los autores hacen uso del software Matlab y los toolbox para el procesamiento y análisis de las señales. Esta computadora facilita además el despliegue de la información relevante para los usuarios.

Este trabajo (Pinzón, Useche, & Rodríguez, 2011) ofrece un análisis más completo del estudio de la calidad de la energía, pero en contraste a la investigación anterior, también requiere de hardware y software mucho más potente al hacer uso de una computadora con un sistema operativo completo.

En 2015 (Díaz Rodríguez, Pabón Fernández, & Contreras Peña, 2015) se implementa un diseño con base en el estándar IEEE 1159-1992, para medir defectos en señales eléctricas tomado en cuenta fenómenos como sags, swells y la distorsión armónica, utilizando una tarjeta de adquisición de datos y realizando el procesamiento en la computadora, lo que permite mostrar también los resultados.

La tecnología empleada en este trabajo (Díaz Rodríguez, Pabón Fernández, & Contreras Peña, 2015) está basada en software y hardware de la compañía National Instruments, utilizando el dispositivo NI USB 6009 para el registro de entrada de la señal, y LabView para programar el procesamiento de los datos y su respectiva interfaz.

En este caso, se tiene un rango mayor del número de eventos que se pueden detectar, pero a cambio se genera un alto costo en la implementación, al requerir tarjetas y software de una compañía específica, por lo que se debe tener en cuenta el costo de las licencias.

De la información anterior se puede observar que existe una amplia investigación acerca del diseño de prototipos para el monitoreo de la calidad de la energía eléctrica. A lo largo de los años, se puede notar que han ido mejorando las capacidades de detección. Conforme ha ido evolucionando la tecnología en componentes electrónicos es posible mejorar las características que ofrecen los instrumentos. Sin embargo, es

notable el uso de computadoras para el procesamiento de los algoritmos encargados del análisis de la información. En el presente proyecto de investigación se contempla el diseño y la construcción de una plataforma que no dependa en su totalidad de un sistema operativo, ejecutando un software para el estudio de los datos sino que, a diferencia de los dispositivos de los que se ha hecho mención, este equipo tendrá un procesamiento independiente con la capacidad de desplegar los resultados para su respectiva visualización incorporada en el mismo, con la posibilidad de enviar esta información a la computadora, pero de manera opcional, como una característica extra.

## **CAPÍTULO I. CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA**

El término calidad de la energía hace referencia a una amplia variedad de fenómenos electromagnéticos presentes en la señal de voltaje y corriente dentro de un sistema de distribución de energía eléctrica en un tiempo dado. Las acciones entre la compañía encargada de la distribución, los fabricantes de aparatos y los usuarios, intervienen en el control de la calidad de la energía eléctrica.

La onda de tensión ideal es sinusoidal, con amplitud y frecuencia determinadas e invariantes. Cuando estas características son alteradas variando sus condiciones ideales, se dice que la onda sufre perturbaciones (IEEE Power & Energy Society, 2009).

La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) define como perturbación toda modificación indeseable, y casi siempre imprevisible, de una señal entrante distinta de la de referencia de la red (Enrique Pinto, 2004).

En la actualidad, el incremento en la aplicación de equipos electrónicos que pueden causar disturbios electromagnéticos y que, a su vez, son sensibles a estos fenómenos, han aumentado el interés en el estudio de la calidad de la energía (Enrique Pinto, 2004).

De acuerdo con la norma IEC61000-1-1, la compatibilidad electromagnética describe el umbral que pueden tolerar y generar los dispositivos, aparatos o sistemas al funcionar de manera adecuada en su entorno electromagnético.

La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) define los métodos para la medición e interpretación de resultados para calidad de la energía para sistemas de alimentación en corriente alterna con frecuencia de 50 Hz o 60 Hz (IEEE Power & Energy Society, 2009). Incluye una clasificación de los principales fenómenos (Tabla 1), así como los parámetros de duración y amplitud para poder identificarlos (Tabla 2).

Tabla 1. Clasificación de los principales fenómenos que afectan la calidad de la energía

Fenómenos conducidos de baja frecuencia	Armónicos, interarmónicos Señales transmitidas en la red Fluctuaciones de voltaje Huecos e interrupciones de voltaje Desequilibrio de voltaje Variaciones de frecuencia Voltaje inducido de baja frecuencia Componente de CD en red CA
Fenómenos radiados de baja frecuencia	Campos magnéticos Campos eléctricos
Fenómenos conducidos de alta frecuencia	Voltajes o corrientes inducidas de onda continuo Transitorios unidireccionales Transitorios oscilatorios
Fenómenos radiados de alta frecuencia	Campos eléctricos Campos magnéticos Campos electromagnéticos Ondas continuas Transitorios
Fenómenos de descarga electrostática	-
Pulsos electromagnéticos nucleares	-

Fuente: Adaptado de IEEE 1159-2009

Tabla 2. Parámetros de disturbios

Categoría	Duración	Magnitud
1. Transitorios		
1.1. Impulsivos		
1.1.1. Nanosegundos	< 50 ns	
1.1.2. Microsegundos	50 ns – 1 ms	
1.1.3. Milisegundos	> 1 ms	
1.2. Oscilatorios		
1.2.1. Baja frecuencia	0.3 – 50 ms	0 – 4 pu
1.2.2. Media frecuencia	20 us	0 – 8 pu
1.2.3. Alta frecuencia	5 us	0 – 4 pu
2. Variaciones rms de corta duración		
2.1. Instantáneas		
2.1.1. Sag	0.5 – 30 ciclos	0.1 – 0.9 pu
2.1.2. Swell	0.5 – 30 ciclos	1.1 – 1.8 pu
2.2. Momentánea		
2.2.1. Interrupciones	0.5 ciclos - 3 s	< 0.1 pu
2.2.2. Sag	30 ciclos - 3 s	0.1 – 0.9 pu
2.2.3. Swell	30 ciclos - 3 s	1.1 – 1.4 pu

Tabla 2. Parámetros de disturbios (continuación)

2.3. Temporales		
2.3.1. Interrupciones	> 3 s – 1 min	< 0.1 pu
2.3.2. Sag	> 3 s – 1 min	0.1 – 0.9 pu
2.3.3. Swell	> 3 s – 1 min	1.1 – 1.2 pu
3. Variaciones rms de larga duración		
3.1. Interrupciones sostenidas	> 1 min	0.0 pu
3.2. Caídas de voltaje	> 1 min	0.8 – 0.9 pu
3.3. Sobrevoltajes	> 1 min	1.1 – 1.2 pu
3.4. Sobrecarga de corriente	> 1 min	
4. Desbalance		
4.1. Voltaje	Estado estable	0.5 – 2%
4.2. Corriente	Estado estable	1.0 – 30%
5. Distorsión de forma de onda		
5.1. Offset CD	Estado estable	0 – 0.1%
5.2. Armónicos	Estado estable	0 – 20%
5.3. Interarmónicos	Estado estable	0 – 2%
5.4. Notching	Estado estable	
5.5. Ruido	Estado estable	0 – 1%
6. Fluctuaciones de voltaje	Intermitente	0.1 – 7%
7. Variaciones de frecuencia	< 10 s	± 0.1 Hz

Fuente: Adaptado de IEEE 1159-2009

## 1.1 CLASIFICACIÓN DE DISTURBIOS

### 1.1.1 Transitorios

El término transitorio es utilizado en el análisis de variaciones de sistemas de energía y hace referencia a un evento no deseado, pero de acción momentánea (Chattopadhyay, Mitra, & Sengupta, 2011). Muestran un cambio en la onda en un periodo corto de tiempo. Puede ser generado por el mismo sistema de distribución de energía o puede ser propagado desde sistemas externos. Aunque estos eventos son de corta duración pueden tener una magnitud muy elevada. Los transitorios afectan el desempeño de los dispositivos tanto como la medición, control y protección de los dispositivos. Esto incrementa la necesidad de caracterizar y analizar de las formas de onda transitorios.

No hay un límite para el periodo de un transitorio, pero generalmente se refiere a fenómenos con una duración menor a un ciclo de la onda (en sistemas de eléctricos con frecuencia de 50 o 60 Hz) (Chattopadhyay, Mitra, & Sengupta, 2011).

Basado en la forma de la onda, los transitorios pueden ser clasificados en:

- Oscilatorios
- Impulsivos

La Tabla 3 muestra las causas probables de transitorios.

*Tabla 3. Principales causas de transitorios*

<b>Clasificación basada en la forma de onda</b>	<b>Clasificación basada en eventos</b>
Transitorios impulsivos	Rayo
Transitorios oscilatorios	Energización de capacitor Re-strike durante la des-energización de capacitor Energización de línea
Transitorios múltiples	Chopping de corriente Re-strikes múltiples Acciones de conmutación repetitivas

*Fuente: Adaptado de IEEE 1159-2009*

### **1.1.1 Transitorio impulsivo**

Está definido como un cambio repentino en el estado estable de voltaje, corriente o ambos, que es unidireccional en polaridad tanto positiva como negativa. Los transitorios impulsivos son amortiguados rápidamente por elementos resistivos y no se propagan más allá de la fuente, por lo que sus efectos son locales (IEEE Power & Energy Society, 2009).

Transitorios impulsivos son comunes durante los relámpagos. Cuando un rayo golpea una línea de transmisión, induce un sobre voltaje impulsivo de alta magnitud. Los sobrevoltajes por rayos pueden ser inducidos también por impactos en terrenos cercanos o incluso entre las nubes. Esos sobrevoltajes son de menor magnitud que los producidos por impactos directos. Normalmente, los transitorios impulsivos muestran un pico repentino seguido de un decaimiento exponencial, pero en algunos casos muestran un pico y después una caída abrupta y una oscilación de pequeña amplitud (IEEE Power & Energy Society, 2009). En la Figura 1 se muestra un transitorio impulsivo causado por un rayo.

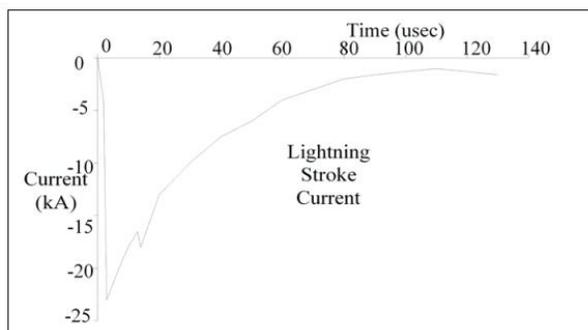
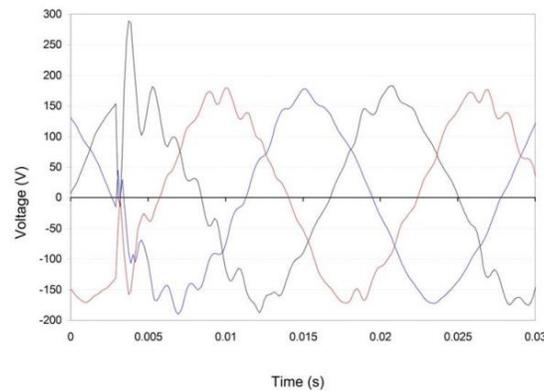


Figura 1. Transitorio impulsivo causado por un rayo  
Fuente: IEEE 1159-2009

### 1.1.1.2 Transitorios oscilatorios

Presentan una oscilación amortiguada con un rango de frecuencia de algunos cientos de Hertz hasta varios Megahertz. Los transitorios oscilatorios tienen mayor dominio que las impulsivas. Por ejemplo, pueden ser causadas por la energización de un banco de capacitores donde la frecuencia de oscilación es principalmente determinada por la capacitancia del banco de capacitores y la inductancia en corto circuito de la retroalimentación. Otra causa común es la energización de la línea de transmisión (Enrique Pinto, 2004). En la Figura 2 se puede observar la representación de un transitorio oscilatorio causado por la energización de un banco de capacitores.



*Figura 2. Transitorio oscilatorio  
Fuente: IEEE 1159-2009*

### **1.1.1.3 Efectos**

La naturaleza y duración de los transitorios de un sistema de energía eléctrica están relacionados con la operación correcta de los interruptores principales y los sobrevoltajes de la activación de las líneas de alto voltaje que rompen el aislamiento del sistema. Altas magnitudes de corriente pueden quemar dispositivos e instrumentos. Los transitorios pueden causar una operación incorrecta en relevadores y activaciones erróneas de circuitos interruptores. La repetición frecuente de transitorios oscilatorios inducidas directa o indirectamente pueden cambiar las propiedades magnéticas de materiales usados en el núcleo de máquinas eléctricas (Enrique Pinto, 2004).

### **1.1.2 Variaciones de corta duración**

Son casi siempre causadas por condiciones de falla, la energización de grandes cargas la cuales demandan un alto consumo de corriente, o pérdidas intermitentes en las líneas de transmisión. Dependiendo de la localización de la falla y las condiciones del sistema, la falla puede causar crestas temporales de voltaje (swells), valles (sags), o una completa pérdida de energía eléctrica (interrupciones). La condición de falla puede estar cerca o lejos del punto de análisis. En cualquier caso, el impacto sobre el voltaje durante la condición de falla actual es una variación de corta duración (Oubrahim, 2017).

### 1.1.2.1 Interrupciones momentáneas y temporales

Una interrupción ocurre cuando el voltaje de suministro o la corriente de carga decrece a menos del 0.1 p.u. (por unidad) para un periodo de tiempo que no exceda 1 minuto. Las interrupciones pueden ser el resultado de fallas en el sistema eléctrico, averías en equipos y malfuncionamiento en dispositivos de control. Las interrupciones son medidas por su duración a partir de que la magnitud del voltaje es en todo momento menor que el 10% del valor nominal. La duración de una interrupción debida al malfuncionamiento de equipo o pérdidas en las conexiones puede ser irregular (IEEE Power & Energy Society, 2009).

Algunas interrupciones pueden estar precedidas por un sag de voltaje cuando son causadas por fallas en la fuente de alimentación, donde el sag ocurre entre el tiempo en que inicia la falla y la activación del dispositivo de protección. La duración de la interrupción dependerá de la capacidad del dispositivo de protección (Chattopadhyay, Mitra, & Sengupta, 2011).

La Figura 3 muestra una interrupción momentánea durante la cual el voltaje cae a cero por 2.3 segundos.

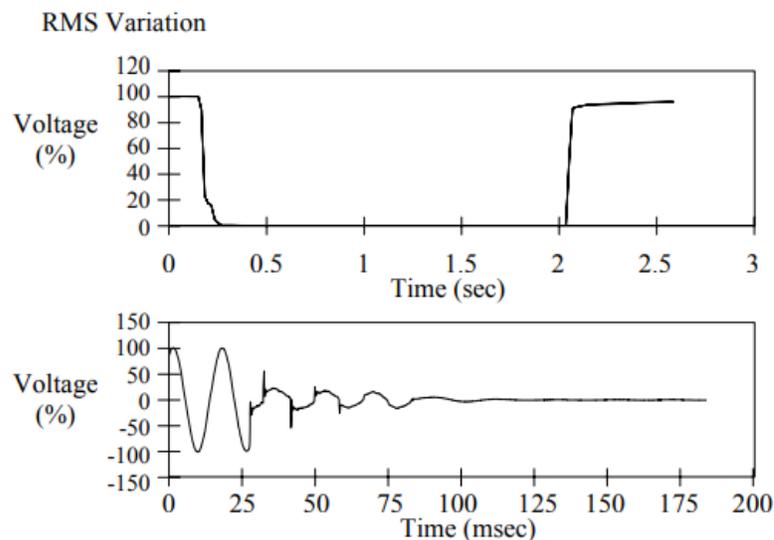


Figura 3. Interrupción momentánea y subsecuente reincorporación  
Fuente: IEEE 1159-2009

### 1.1.2.2 Sags

Un sag (IEEE Power & Energy Society, 2009) es un decaimiento en el voltaje rms entre 0.1 y 0.9 pu con una duración desde 0.5 ciclos a 1 minuto. La terminología usada para describir la magnitud de un sag podría parecer un poco confusa, por ejemplo, un sag del 20% puede referirse a un sag de 0.8 pu o de 0.2 pu. Preferentemente se debe optar por el uso del término para referirse al voltaje remanente. Por ejemplo, un sag 80% hace referencia a un disturbio que resulta en un voltaje de 0.8 pu. De ser posible también se debería especificar el valor nominal o nivel base. Para el ejemplo anterior, un sag de 80% dará como resultado diferentes niveles de voltaje si el valor nominal es de 460 V (dando un voltaje de 368 V) o 480 V (dando como resultado 384 V).

Los sags (IEEE Power & Energy Society, 2009) son usualmente asociados con fallas en el sistema, pero también pueden ser causados por la activación de cargas pesadas o el arranque de grandes motores. La Figura 4 muestra un sag de voltaje que puede estar asociado con una falla de conexión de línea a tierra. El restablecimiento de la falla generalmente tarda de 3 a 30 ciclos, dependiendo de la magnitud de la falla y el tipo de protección, detección e interrupción de sobrecorriente.

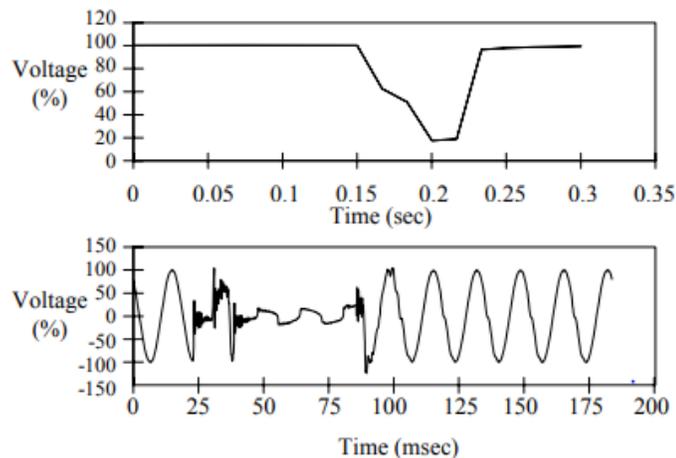
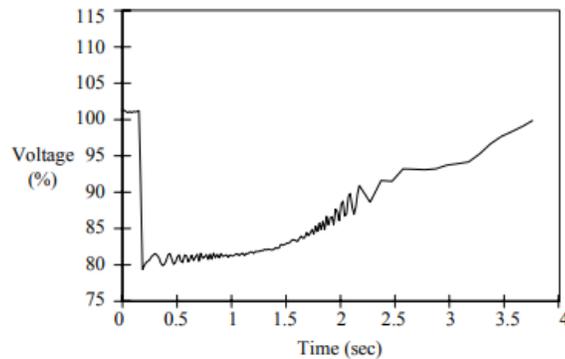


Figura 4. Sag de voltaje instantáneo  
Fuente: IEEE 1159-2009

Los sags pueden ser causados también por el arranque de grandes motores o cambios en cargas muy grandes. Un motor de inducción puede consumir hasta seis veces su corriente de carga total durante el arranque. Esta enorme corriente causa una caída de voltaje a través de la impedancia del sistema. En la Figura 5 se puede observar el resultado del arranque de un motor grande.



*Figura 5. Sag temporal causado por el arranque de un motor  
Fuente: IEEE 1159-2009*

El término sag ha sido usado por la comunidad de calidad de la energía por muchos años para referirse al decaimiento del voltaje de corta duración (Enrique Pinto, 2004). La idea principal es tomada directamente de la traducción de la palabra sag, cuyo significado podría ser hundimiento. Este disturbio está definido por la IEC con el nombre de dip. Los dos términos se consideran correctos, aunque la palabra sag es más utilizada en la comunidad de Norteamérica.

Los sags son considerados desde 2 ms (aproximadamente 1/8 de ciclo) hasta algunos minutos en algunas publicaciones (IEEE Power & Energy Society, 2009). Una caída de voltaje de menos de la mitad de un ciclo no puede ser caracterizada efectivamente como un cambio en el valor rms por lo que son considerados transitorios. Caídas de voltaje que duran más de un minuto pueden ser controladas por equipos de regulación de voltaje y están asociadas con una amplia variedad de causas y son clasificadas como variaciones de larga duración.

Para trabajar en la práctica, las duraciones de los sags están divididas en tres categorías, que también se aplican para las interrupciones y los swells (IEEE Power & Energy Society, 2009).

Dentro de las causas de sags podemos encontrar lo siguiente:

Energización de cargas pesadas: la activación repentina de cargas pesadas reduce el nivel de voltaje. Si el suministro es capaz de entregar esta alta demanda, entonces el nivel de voltaje regresará a su valor normal de manera rápida. Un ejemplo se presenta al conectar un horno de arco que puede causar sag o dip en el sistema eléctrico (Enrique Pinto, 2004).

Activación de motores grandes de inducción: los motores de inducción de múltiples fases consumen bastante corriente durante su inicio. Debido a esto al conectar grandes motores de inducción al suministro es común que cause sags en el sistema eléctrico (Enrique Pinto, 2004).

Fallas por corto entre línea y tierra: ocurren cuando una línea de alimentación hace contacto con la referencia a tierra reduciendo el voltaje en el suministro causando sags en el sistema eléctrico (Enrique Pinto, 2004).

Transferencia de carga de una fuente de alimentación a otra: en el momento en que una carga se transfiere de una fuente a otra o de una fase a otra, pueden ocurrir sags (Enrique Pinto, 2004).

Los efectos de un sag principalmente son los siguientes (IEEE Power & Energy Society, 2009):

- Inestabilidad de voltaje debido a la reducción del suministro por una breve duración.
- Malfuncionamiento de dispositivos eléctricos de bajo voltaje.
- Malfuncionamiento de fuentes de alimentación sin interrupción.
- Malfuncionamiento de equipos de medición y control.
- Errores en interfaces y señales de comunicación.

### 1.1.2.3 Swells

Un swell es un incremento en el voltaje rms arriba de 1.1 pu para duraciones desde medio ciclo hasta un minuto (IEEE Power & Energy Society, 2009). Generalmente, la magnitud está comprendida entre 1.1 pu y 1.2 pu. La magnitud de un swell también está descrita por el voltaje remanente y siempre será mayor a 1.0 pu.

De la misma manera que con los sags, los swells están relacionados con condiciones de fallas en el sistema, pero son menos comunes que los sags. Los swells pueden ser causados por la desactivación de cargas muy grandes o de grandes bancos de capacitores (IEEE Power & Energy Society, 2009). En la Figura 6 se observa un swell tanto en su forma de onda de la gráfica inferior, como su resultado en voltaje rms en el gráfico superior. Se puede notar que el tiempo de inicio y fin en cada gráfico no corresponde de manera exacta.

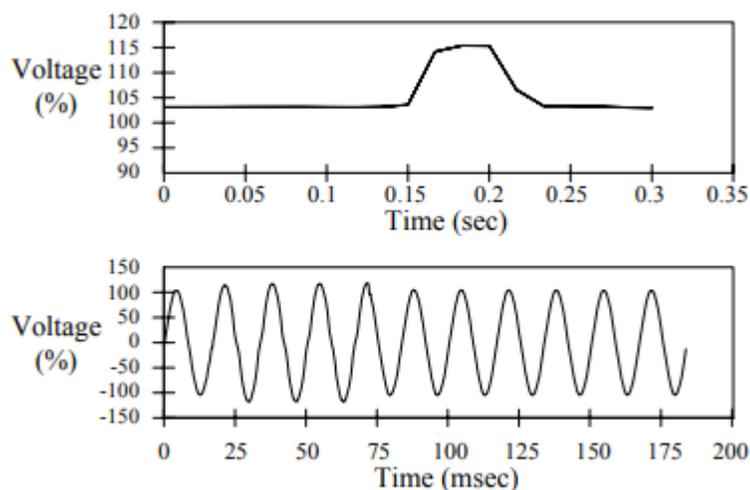


Figura 6. Ejemplo de swell de voltaje  
Fuente: IEEE 1159-2009

### **1.1.3 Variaciones de larga duración**

Comprenden desviaciones en el voltaje que están presentes durante un tiempo mayor a un minuto. Pueden ser sobrevoltajes o caídas de voltaje. Generalmente no son resultado de fallos del sistema. Son causados por variaciones en cargas conectadas al sistema y operaciones de activación de sistemas (Chattopadhyay, Mitra, & Sengupta, 2011).

#### **1.1.3.1 Sobrevoltaje**

Es un incremento en el voltaje mayor a 1.1 pu para una duración mayor a un minuto (Chattopadhyay, Mitra, & Sengupta, 2011). Generalmente se sitúan entre 1.1 pu y 1.2 pu.

Los sobrevoltajes pueden ser resultado de desactivación de cargas o de variaciones en la compensación reactiva del sistema eléctrico (por ejemplo, al activar un banco de capacitores). También pueden ser resultado de una configuración incorrecta en el transformador (Chattopadhyay, Mitra, & Sengupta, 2011).

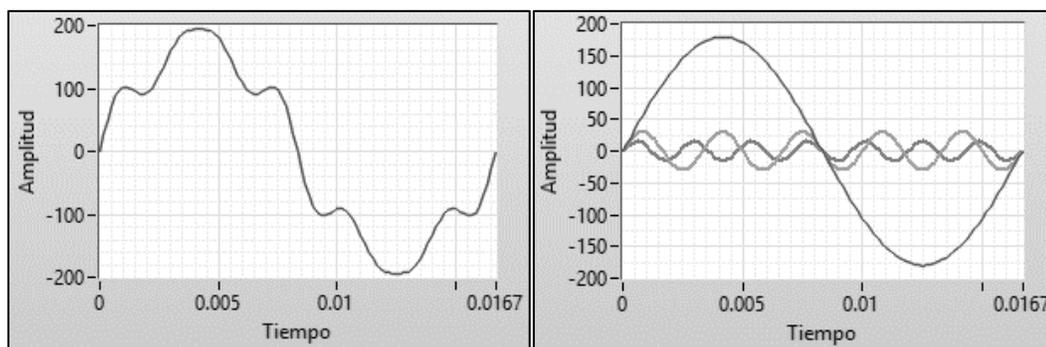
### **1.1.4 Armónicos**

Los armónicos son voltajes sinusoidales que tienen una frecuencia que es un múltiplo entero de la frecuencia a la cual trabaja el sistema de suministro (también llamada frecuencia fundamental, usualmente de 50 Hz o 60 Hz). Al combinarse con el voltaje fundamental, los armónicos provocan una distorsión en la forma de onda. La distorsión por armónicos generalmente existe debido las características no lineales de algunas cargas o dispositivos (Enrique Pinto, 2004).

Los equipos basados en electrónica de potencia son los dispositivos que mayor contribuyen a la generación de armónicos del sistema eléctrico. Este tipo de cargas usualmente son modeladas como fuentes de corriente que insertan armónicos al sistema eléctrico. La distorsión armónica es un problema que está creciendo y que afecta a muchos usuarios, así como a la mayoría de los sistemas eléctricos debido al incremento en la aplicación de equipo de electrónica de potencia (Enrique Pinto, 2004).

Los niveles de distorsión por armónicos pueden ser caracterizados por un espectro completo de armónicos con magnitudes y ángulos de fase de cada componente armónica independiente. También es útil utilizar una sola cantidad conocida como Distorsión Armónica Total (THD), como la medida de la magnitud de la distorsión armónica (Chattopadhyay, Mitra, & Sengupta, 2011).

En la Figura 7 se muestra una señal alterada por armónicos y el espectro con la medición de cada componente.



*Figura 7. Ejemplo de señal con distorsión armónica y sus componentes*

## **1.2 MONITOREO DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA**

El monitoreo de la calidad de la energía es indispensable para caracterizar fenómenos electromagnéticos en una ubicación específica dentro de un sistema eléctrico. En algunos casos, la razón por la que se desea el monitoreo es para evaluar incompatibilidades entre el suministro y una carga específica. En otros casos, se requiere analizar el ambiente eléctrico en una locación particular para desarrollar mejor técnicas de diseño. También es posible ocupar este estudio para predecir el desempeño futuro de cierto equipo (IEEE Power & Energy Society, 2009).

Existen diversas razones para monitorear la calidad de la energía. La razón principal es la parte económica, en especial si los disturbios y fenómenos electromagnéticos se encuentran afectando parte del equipo que sea fundamental en el desarrollo de un proceso. Se podrían considerar fallas, daños, interrupciones del proceso y muchas

otras anomalías. Las interrupciones inesperadas en una línea de producción suelen generar gastos elevados y deben ser corregidas para continuar con el proceso. Además, las fallas en equipos pueden requerir de una reparación haciendo que se pierda tiempo y dinero. Daños en el producto final también puede ser consecuencia de estos defectos en el sistema eléctrico, provocando que el producto tenga que ser reciclado o descartado (Enrique Pinto, 2004).

A partir del monitoreo de la calidad de la energía eléctrica, además de prevenir o ayudar al diagnóstico del equipo, también se puede generar una base de datos de tolerancia y sensibilidad a partir de la medición periódica de fenómenos electromagnéticos. Una base de datos puede generar la base del desarrollo de especificaciones de compatibilidad electromagnética para el manejo de futuros equipos (Kilter, Meyer, Howe, & Zavoda, 2012).

### **1.2.1 Instrumentos de monitoreo**

Los instrumentos para el monitoreo de calidad de la energía eléctrica van desde simples voltímetros analógicos hasta sistemas sofisticados de instalación permanente en el sistema para un monitoreo continuo.

La primera generación de monitores de calidad de la energía comenzó a mediados de 1970. La salida de estos dispositivos era a través de texto indicando un evento ocurrido. La segunda generación de monitores incluía salidas con gráficos de la forma de onda donde se capturaba parte del evento. A mediados de los 80 comenzó la tercera generación de instrumentos con algunos megahertz de muestreo para obtener mayor detalle en los transitorios. En el presente nos encontramos con la cuarta generación de monitores utilizando interfaces basadas en estándares, permitiendo incrementar la flexibilidad y sofisticación a un costo moderado (IEEE Power & Energy Society, 2009).

## **1.2.2 Clasificación de instrumentos**

### **1.2.2.1 Indicadores de eventos**

Estos instrumentos se encargan de recoger y desplegar datos que son generados al presentarse una variación en el sistema de energía. Pueden ser diseñados para detectar un tipo de evento en específico o para clasificar varios tipos de eventos. Generalmente, al presentarse un disturbio en el sistema eléctrico, estos dispositivos producen una alerta a través de un indicador luminoso, una alarma audible o tal vez ambos, aunque es bastante común que no tengan manera de guardar algo de información (IEEE Power & Energy Society, 2009).

Los indicadores de eventos recolectan variaciones del sistema eléctrico y las comparan con una condición de estado estable con el uso de parámetros para establecer los límites permitidos. Estos parámetros pueden ya estar ajustados de fábrica o pueden ser cambiados por el usuario. Dependiendo de este umbral de tolerancia, será el número de eventos que se puedan captar.

### **1.2.2.2 Osciloscopio**

Los osciloscopios pueden ser usados para proveer una representación visual de la forma de onda de señales eléctricas (IEEE Power & Energy Society, 2009). Los osciloscopios digitales más recientes tienen la capacidad de almacenar formas de onda, incluso pueden mostrar diferentes mediciones como pocos, promedio, rms, etc.

Generalmente, los osciloscopios son diseñados para que el usuario pueda medir y analizar una forma de onda, pero depende del mismo usuario la interpretación de las variaciones en la señal y la decisión del lapso de tiempo de la onda que será guardada.

### 1.3 CONTRIBUCIÓN A LA LITERATURA PUBLICADA

Los resultados de este trabajo de investigación fueron publicados en formato de artículo, con el título “Platform design for monitoring the quality of electrical energy” de la página 1 a la 9, del volumen 5, número 15 del “Journal of Computational Systems and ICTs” editado por ECORFAN-México, S. C. Holding Spain (2019) (ver Anexo A).

El artículo cuenta con la siguiente clasificación:

Área: Ingeniería y tecnología

Campo: Ciencias tecnológicas

Disciplina: Tecnologías computacionales

Subdisciplina: Sistemas de control de calidad automáticos

El journal es arbitrado por revisión por pares y está indexado en las siguientes bases de datos:

- LATINDEX (Scientific Journals of Latin América, Spain and Portugal)
- RESEARCH GATE (Germany)
- GOOGLE SCHOLAR (Citations indices – Google)
- REDIB (Ibero-American Network of Innovation and Scientific Knowledge – CSIC)
- MENDELEY (Bibliographic References Manager)

Autor:

- Salomón Noé Turiján Altamirano

Coautores:

- Germán Arduo Muñoz Hernández
- Omar Chávez Cano
- Julio Rodríguez González

## CAPÍTULO II. ARQUITECTURA DE LA PLATAFORMA

En el presente capítulo se describe la implementación de la plataforma para monitoreo de calidad de la energía eléctrica, haciendo una revisión a la selección de los componentes y su respectiva integración en el prototipo experimental para llevar a cabo la detección de sags, swells y la medición de armónicos.

En la Figura 8 se muestra el diagrama a bloques de las etapas que componen a la plataforma. La medición se realiza a partir de una línea monofásica del suministro eléctrico, posteriormente pasa por un circuito de acoplamiento para reducir el nivel de voltaje, continuando por un convertidor analógico digital para hacer un muestreo de la señal en tiempo discreto, en este punto los datos podrán ser procesados a través de diferentes algoritmos para obtener los resultados requeridos que serán mostrados al usuario a través del despliegue de eventos o de la información relevante.



*Figura 8. Esquema de la plataforma de monitoreo de calidad de la energía eléctrica*

En la Figura 8 también se muestran las etapas que estarán contenidas en el prototipo, donde se puede observar que la fase de acoplamiento se implementará de manera externa. Más adelante se describe el circuito con el que se realizaron las pruebas, sin embargo, existen diferentes maneras y dispositivos para poder llevar a cabo dicha tarea.

## 2.1 PROCESAMIENTO

Para el desarrollo del proyecto se hizo uso de la tarjeta ASSERTA (Figura 9) de la compañía INTESC (INTESC electronics & embedded, 2019), que ofrece una plataforma de diseño con los componentes necesarios para diferentes aplicaciones, con la posibilidad de llevar a cabo sistemas de procesamiento en paralelo, esto gracias a que en su núcleo cuenta con un FPGA de la compañía Xilinx.



*Figura 9. Tarjeta de desarrollo ASSERTA*

La tarjeta ASSERTA contiene los siguientes elementos:

- FPGA Spartan 6
- Convertidor USB a RS232 (para programación)
- 16 terminales de propósito general I/O
- 8 interruptores
- 8 LEDs
- 12 ADC
- 4 DAC
- Cristal de 50 MHz
- RAM 512 Mbit
- Regulador de voltaje de 1.2 vdc

En la Figura 10 se muestra un esquema de la configuración de la tarjeta ASSERTA.

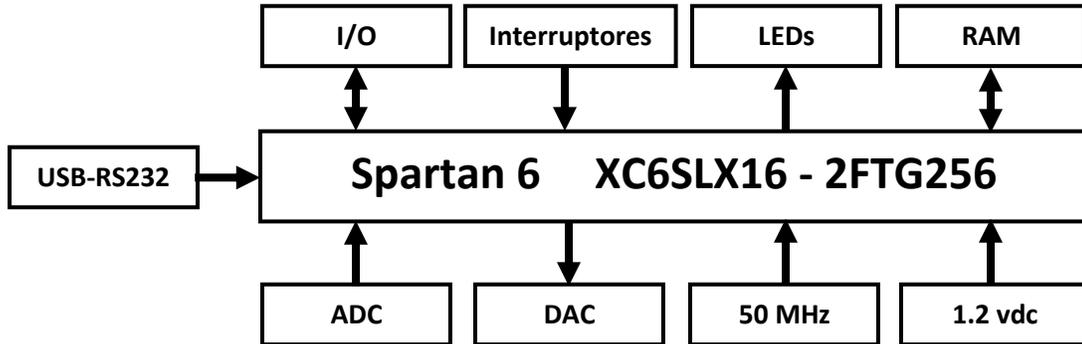


Figura 10. Diagrama a bloques de tarjeta ASSERTA

La tarjeta requiere una fuente de 5 volts de corriente directa para su alimentación y contiene dos reguladores de voltaje de 3.3 v y de 1.2 v para el FPGA y sus respectivos componentes.

El FPGA puede ser programado por medio del conector USB y del convertidor a RS232. Se requiere el software INTegra (Figura 11), también de Intesc, para realizar la conexión entre la computadora y el dispositivo y así poder descargar el archivo .bit al FPGA.



Figura 11. Interfaz de software INTegra v1.0

El FPGA Spartan 6 ofrece un sistema con capacidades de integración con un bajo costo para aplicaciones de alto volumen. Este componente expande la densidad de celdas lógicas con la mitad de consumo eléctrico, comparado con la generación anterior. Construida con tecnología de 45 nm de baja potencia, ofrece el equilibrio óptimo de costo, potencia y rendimiento.

En la Tabla 4 se enlistan las características principales del FPGA:

*Tabla 4. Características principales FPGA Spartan 6*

Dispositivo	XC6SLX16
Encapsulado	FTG256
Celdas lógicas	14,579
Slices	2,278
Flip-Flops	18,224
DSP48A1 Slices	32
Bloques RAM	32
Bancos I/O	4
I/O usuario	186

El FPGA Spartan 6 es fabricado por Xilinx, que también ofrece el software ISE Design Suite para configurar y programar el dispositivo, con la posibilidad de ocupar Lenguaje de Descripción de Hardware (HDL).

En el apartado de licencia, Xilinx pone a disposición de los usuarios la versión WebPACK totalmente gratis. Con esto se tiene una solución en el diseño de aplicaciones ofreciendo síntesis, simulación e implementación de algoritmos para FPGA. Esta versión es compatible con los sistemas operativos Windows y Linux.

Prestaciones disponibles:

- Kit de Desarrollo de Software

- Plataforma Project Navigator
- CORE Generator
- PlanAhead
- Optimización de consumo
- Síntesis XST
- Simulador ISim versión Lite

## 2.2 CONVERTIDOR ANALÓGICO DIGITAL

La tarjeta ASSERTA cuenta con un convertidor AD7265 de Analog Devices (ANALOG DEVICES, 2018) de montaje superficial soldado en placa, como se muestra en la Figura 12, para conseguir la etapa de adquisición de datos. El dispositivo está interconectado con el FPGA para la implementación del protocolo SPI, con una distribución de terminales como se muestra en la Tabla 5.



*Figura 12. Convertidor AD7265*

*Tabla 5. Conexiones entre FPGA Y AD7265*

NOMBRE	FPGA	ADC
DOA	N14	30
DOB	R16	28
CS	R15	26
SCK	K12	27
RAN	M15	21
A0	P15	25
A1	P16	24
A2	N16	23

Las características principales de este componente son las siguientes:

- Resolución de 12 bits
- Velocidad de adquisición máxima de 1 MSPS
- Voltaje de trabajo de 2.7 v a 5.25 v
- Consumo de potencia
  - 7 mW a 1 MSPS alimentado a 3 v
  - 17 mW a 1 MSPS alimentado a 5 v
- Entradas analógicas configurables
  - 12 canales de entrada simple
  - 6 canales de entrada diferencial
  - 6 canales de entrada pseudo diferencial
- Interfaz de comunicación serial de alta velocidad

En la Figura 13 se muestra el diagrama a bloques del componente AD7265. La descripción de las terminales se muestra en la Tabla 6.

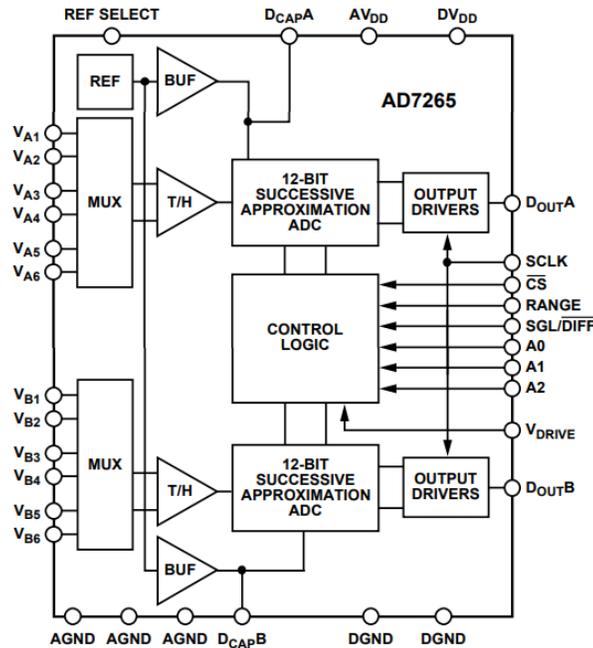


Figura 13. Esquema del convertidor AD7265

Tabla 6. Terminales del convertidor AD7265

Terminal	Descripción
DGND	Tierra digital
REF SELECT	Selección de referencia interna/externa
AV <sub>DD</sub>	Suministro de voltaje analógico. De 2.7 v a 5.25 v
D <sub>CAP</sub> A, D <sub>CAP</sub> B	Terminales para capacitores de desacoplamiento.
AGND	Tierra analógica
V <sub>A1</sub> a V <sub>A6</sub>	Entradas analógicas de ADC A
V <sub>B6</sub> a V <sub>B1</sub>	Entradas analógicas de ADC B
RANGE	Selección del rango de entrada analógica
SGL/DIFF	Terminal de selección de entrada simple/diferencial
A2 a A0	Selector del multiplexor
CS	Selector de chip. Terminal de comunicación
SCLK	Reloj serial. Terminal de comunicación
D <sub>OUT</sub> B, D <sub>OUT</sub> A	Salidas de datos seriales. Terminal de comunicación
V <sub>DRIVE</sub>	Suministro al que trabajarán terminales de comunicación
DVDD	Suministro de voltaje digital. De 2.7 v a 5.25 v

Las terminales de entrada del convertidor se encuentran disponibles a través de conectores tipo SMA en el área de canales analógicos de la tarjeta ASSERTA como se muestra en la Figura 14.

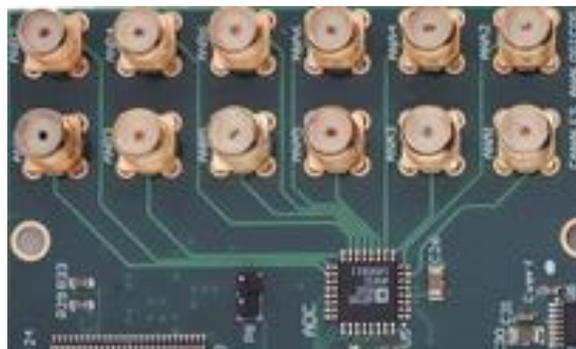


Figura 14. Conectores para las entradas del convertidor

Para realizar el acoplamiento con las puntas de prueba que se utilizaron para la adquisición de la señal de entrada, se hizo uso de un adaptador de conexión de BNC macho a SMA hembra, como se muestra en la Figura 15.



*Figura 15. Adecuación de conexión SMA a BNC*

## **2.3 DESPLIEGUE DE RESULTADOS**

Después de procesar la señal de entrada, aplicando los algoritmos correspondientes, se muestran los resultados del análisis para que puedan ser atendidos por el usuario del monitor de calidad de la energía.

La plataforma es diseñada para operar en tres modalidades diferentes, de acuerdo con el estándar IEEE 1159-2009, en la clasificación de instrumentos para calidad de la energía, esto permite al usuario utilizar el dispositivo de acuerdo con sus requerimientos.

### **2.3.1 Modo básico**

En esta modalidad el equipo tiene la función de desplegar un indicador en el momento en el que ocurra un disturbio, notificando el tipo de evento y una marca de tiempo. Esta tarea es implementada en el prototipo por medio de LEDs y un módulo de 4 display de 7 segmentos (Figura 16), dejando habilitados los interruptores para algunas configuraciones.

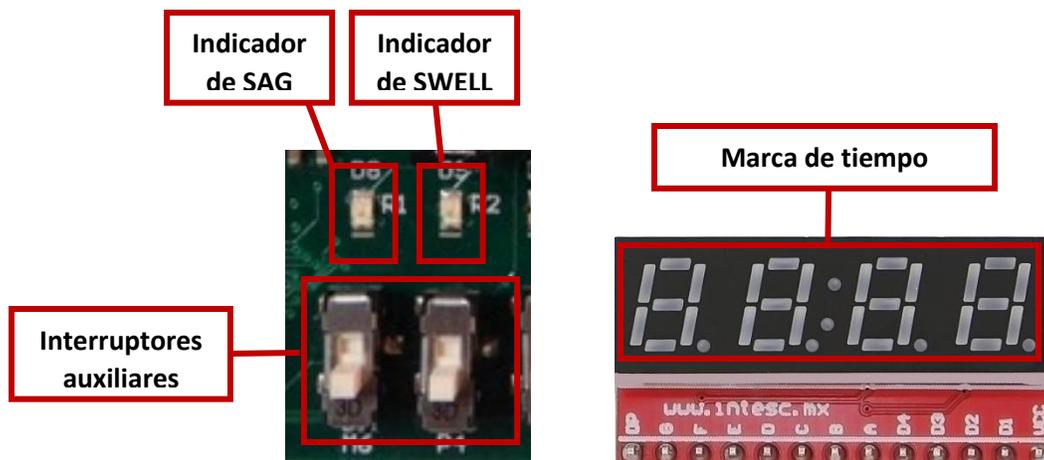


Figura 16. Indicadores para el modo básico

En este caso el instrumento puede dejarse conectado al suministro eléctrico de algún proceso durante un periodo de varias horas y el usuario podrá reconocer y atender la última variación que se haya presentado.

### 2.3.2 Modo gráfico

La segunda configuración tiene como objetivo desplegar una cantidad mayor de información acerca de la señal que se está analizando, por medio de la incorporación de una pantalla de cristal líquido de 3.2 pulgadas con una resolución de 320 x 240 píxeles, capaz de mostrar gráficos y texto (ver Figura 17).



Figura 17. Display de cristal líquido de 3.2 pulgadas

El display es utilizado para mostrar la adquisición de datos que está llevando a cabo, para poder observar la forma de onda de la señal de entrada, de manera similar a un osciloscopio, además de mostrar la lista de eventos que tienen registrados.

Otra característica implementada, gracias a la pantalla, es el despliegue del espectro de frecuencia de la onda, para visualizar la distorsión armónica de la señal eléctrica.

Con este segundo modo es posible ocupar el equipo para realizar diagnósticos de la señal actual al ser capaz de observar la deformación de la señal y conocer la magnitud de cada componente armónico.

### **2.3.3 Modo de conexión a la PC**

Una de las características incorporadas en los instrumentos de los últimos años es la posibilidad de transferir información del equipo hacia una computadora. Este modo puede aplicarse en el caso de que se requiera un monitoreo continuo de la señal, con la comodidad de poder visualizar la información en una interfaz gráfica completa desde de la pantalla de una computadora.

Para este recurso se ha habilitado la conexión mini USB de la tarjeta ASSERTA (ver Figura 18), que permite la conexión a un puerto de la computadora para la transferencia de datos.



*Figura 18. Puerto USB para comunicación con la computadora*

Se ha diseñado una interfaz gráfica por medio del ambiente de programación del software LabVIEW en el que se despliegan los detalles a través de gráficos y tablas.

## 2.4 ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL

Para poder tomar la lectura del suministro eléctrico es necesario realizar una adecuación a la señal original, debido a que se debe contemplar una onda senoidal con un voltaje eficaz de 127 volts, por lo que se tiene un voltaje pico de 180 volts aproximadamente. Estos niveles tienen que ser adaptados antes de ser enviados al circuito ADC, que solamente permite un valor máximo de 5 volts, como lo muestra la figura (Joao, Batista, & Sepúlveda, 2003).

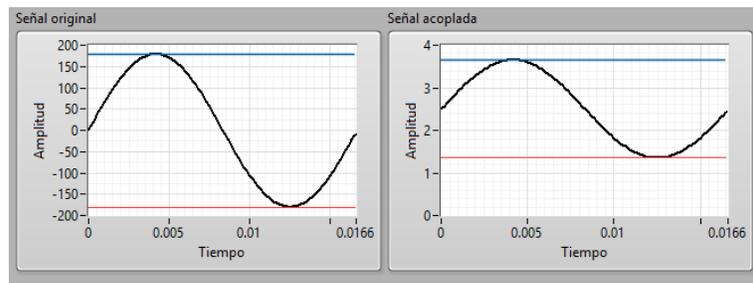


Figura 19. Señal original por medir y señal requerida

En la Figura 19 se puede observar que se requiere cambiar dos aspectos de la señal de suministro eléctrico, la primera es la amplitud de la onda y la segunda es montar la señal sobre un nivel de corriente directa para debido para no tener que contemplar la parte negativa. Para cubrir estos requerimientos se implementa un circuito, como se muestra en la Figura 20.

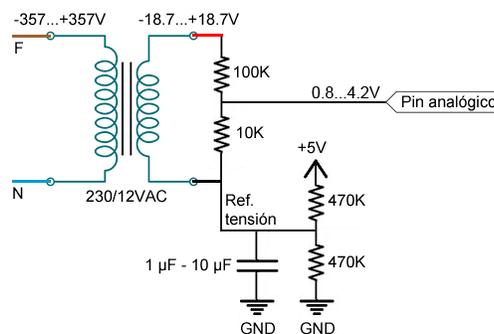
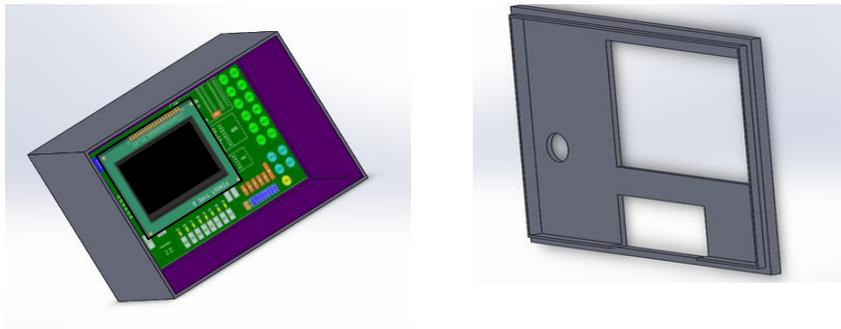


Figura 20. Circuito de adecuación de señal

El transformador de voltaje permite reducir la amplitud de la señal en un factor de 1:10 lo que nos permite obtener voltajes pico positivos y negativos de 12.7 volts. En el devanado secundario del transformador se conecta un divisor de voltaje con factor de 1:11 lo que prácticamente dejaría la señal con picos de 1.15 volts. El último circuito, conformado por un arreglo de resistencias y un capacitor, tiene la función de subir el eje de origen de la señal sobre un nivel de 2.5 volts. Como resultado obtenemos una variación desde 1.35 volts hasta 3.65 volts.

## 2.5 DISEÑO DE CARCASA

Para tener un grado de protección se diseña un encapsulado para su respectiva impresión en 3D con material de plástico abs. En la Figura 21 y Figura 22 se muestra el diseño de la caja para contener a la tarjeta y el resto de componentes y en la se tiene el prototipo ensamblado.



*Figura 21. Carcasa para la plataforma*



*Figura 22. Prototipo ensamblado*

## CAPÍTULO III. DISEÑO Y SIMULACIÓN DE ALGORITMOS

En este capítulo se hace una revisión al proceso de diseño de los algoritmos para el monitoreo de distorsiones en el suministro eléctrico. Una vez realizado, cada programa se verifica por medio de simulaciones para verificar sus parámetros y condiciones óptimas de funcionamiento.

Estos algoritmos son implementados en el FPGA por medio de Lenguaje de Descripción de Hardware, aprovechando la característica del procesamiento en paralelo para aplicar el análisis a los datos de entrada (Biletskiy, Nanacekivell, Chang, & Riming, 2017).

En la Figura 23 se muestra la estructura del programa para el desarrollo de la plataforma de monitoreo, en donde cada bloque representa una parte del código con un objetivo en específico.

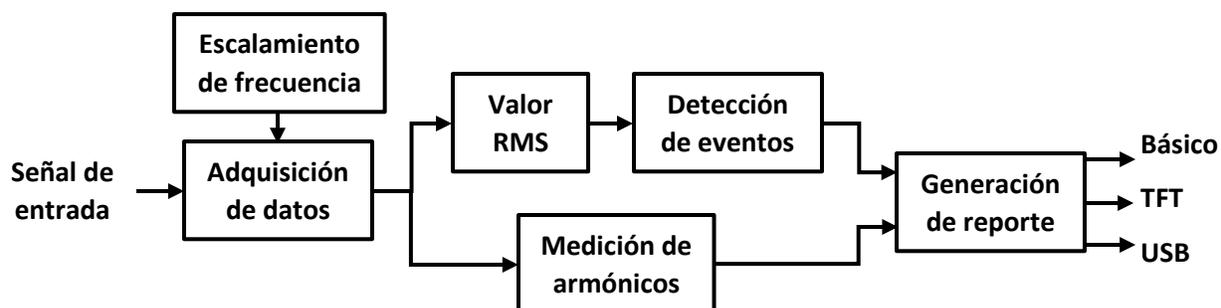


Figura 23. Arquitectura de software para monitor de calidad de la energía

### 3. 1 ESCALAMIENTO DE FRECUENCIA

Parte fundamental del funcionamiento de cada bloque del programa es la frecuencia de trabajo, que servirá para las distintas tareas y sincronización de procesos. Para el diseño del equipo se parte de los pulsos de reloj que entrega el cristal, con una frecuencia de 50 MHz. Esta frecuencia debe ser modificada para conseguir el funcionamiento correcto del convertidor analógico digital, como se explica en la

sección de adquisición de datos. Este módulo tiene como función obtener una señal de reloj con las características de la Tabla 7.

Tabla 7. Características de la señal de reloj

	Señal original	Señal escalada
<b>Forma de onda</b>	Cuadrada	Cuadrada
<b>Frecuencia</b>	50 MHz	61.44 KHz
<b>Periodo</b>	20 nS	16.276 uS
<b>Ciclo de trabajo</b>	50%	50%

En la Figura 24 se muestra el algoritmo para conseguir el escalamiento de la señal, en cual consiste básicamente en formar un ciclo con el tiempo total del periodo que se quiere conseguir. Para eso se dejan pasar 814 pulsos de 20 nS dando un total de 16.28 uS. La mitad del ciclo la salida permanece en alto y la otra mitad en bajo para obtener un ciclo de trabajo del 50%.

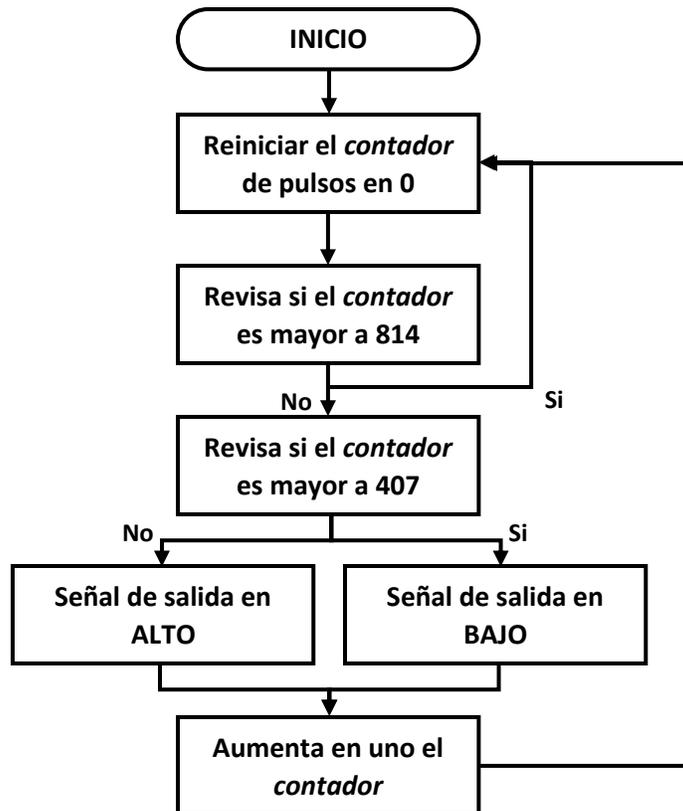


Figura 24. Algoritmo para escalamiento de señal de reloj

Una vez implementado el código, se elabora la simulación para comprobar su funcionamiento. En la Figura 25 se puede observar el periodo de la frecuencia de salida, alcanzando los 16.28  $\mu\text{s}$  a partir de la señal de reloj que proporciona el cristal.

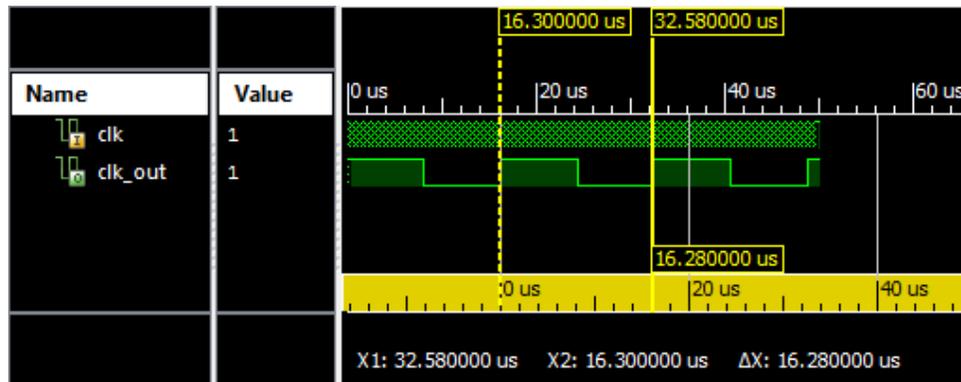


Figura 25. Simulación de escalamiento de frecuencia

## 3.2 ADQUISICIÓN DE DATOS

En esta etapa se estudia el proceso de convertir una señal en tiempo continuo a una en tiempo discreto para que pueda ser procesada por la plataforma propuesta, que es un sistema digital.

### 3.2.1 Muestreo

En el tratamiento de señales es importante la revisión de los parámetros de muestreo para que exista una entrada de datos adecuada (V. Oppenheim, W. Schafer, & R. Buck).

Para la selección de la frecuencia de muestreo se toma como referencia la frecuencia fundamental de la señal que se analiza, en este caso se contempla la señal senoidal del suministro eléctrico con  $f = 60 \text{ Hz}$ . Debido a que los algoritmos serán aplicados en cada ciclo completo de la onda se debe seleccionar el número de muestras  $N$  en el

que se divide el periodo del ciclo  $T$  que es de 16.66 milisegundos, como se muestra en la Figura 26.

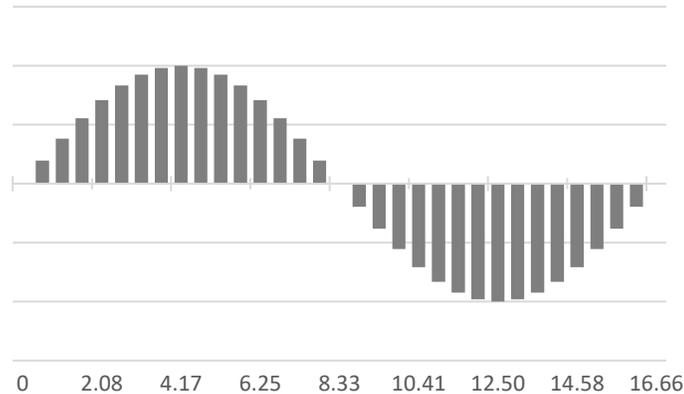


Figura 26. Ciclo completo de la onda senoidal con  $f=60$  Hz,  $T=16.66$  mS

Para ofrecer la posibilidad de aplicar la optimización de algoritmos se fija  $N$  con un valor que sea potencia de 2.

$$N = 64$$

$$T_s = \frac{T}{N} = \frac{16.66 \text{ mS}}{64} \approx 260.42 \text{ uS} \quad (1)$$

$$f_s = \frac{1}{T_s} = \frac{1}{260.42 \text{ uS}} = 3840 \text{ Hz} \quad (2)$$

Eso implica que cada muestra debe ser adquirida cada 260.42 microsegundos, es decir, la frecuencia de muestreo es de 3840 Hz.

Por otro lado, el objetivo del proyecto se estableció en medir los primeros 30 armónicos del suministro eléctrico que corresponde a una frecuencia de 1800 Hz. De acuerdo con la teoría del muestreo, la frecuencia con la que se debería realizar la adquisición de datos tendría que ser mayor al doble de la frecuencia máxima que se quiere medir,

para evitar el efecto de empalme (antialiasing) (Ambardar, 2002). Lo anterior implica que se requiere de una frecuencia mayor a 3600 Hz.

$$f_s > 2 * f_{30vo} \quad (3)$$

$$f_s > 2 * 1800 \text{ Hz} \quad (4)$$

$$f_s > 3600 \text{ Hz} \quad (5)$$

Debido a esto la frecuencia seleccionada de 3840 Hz cumple con los requerimientos para el muestreo de la señal, incluso permite la medición del armónico número 31 que tiene una frecuencia de 1860 Hz.

$$3840 \text{ Hz} > 2 * f_{31vo} \quad (6)$$

$$3840 \text{ Hz} > 2 * 1860 \text{ Hz} \quad (7)$$

$$3840 \text{ Hz} > 3720 \text{ Hz} \quad (8)$$

### 3.2.2 Convertidor analógico-digital

El componente AD7265 está habilitado para comunicarse con otros dispositivos por medio del protocolo SPI. En la Figura 27 se muestra el diagrama de tiempo para la transferencia de datos de la adquisición realizada previamente.

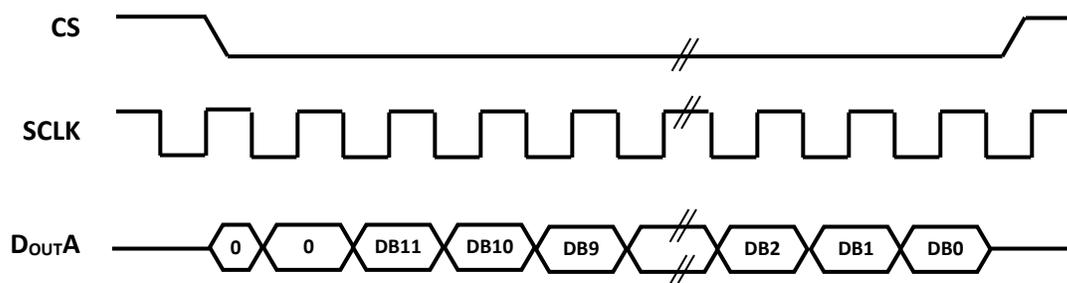


Figura 27. Diagrama de tiempo de comunicación del ADC

El convertidor debe transmitir el resultado de la conversión analógico-digital a través del envío serial de la información. Al habilitarse la terminal CS, el dispositivo envía dos datos que deben ser descartados, seguido de los 12 bits de la conversión (DB11 a DB0). La sincronización del chip con el fpga se realiza por medio de la señal de reloj SCLK.

Para el funcionamiento correcto del circuito se toman dos ciclos de reloj para los datos sin valor, 12 pulsos del reloj para los datos de la conversión y dos ciclos más con el ADC deshabilitado, lo que nos deja un ciclo de adquisición de una muestra cada 16 pulsos. Debido a que el periodo de la señal de salida del módulo de escalamiento de frecuencia es de 16.28 uS, tenemos un periodo de muestreo 260.48 uS y a su vez una frecuencia de muestreo de 3840 Hz, que es el valor planteado en la sección anterior. En la Figura 28 se muestra la secuencia implementada para la comunicación.

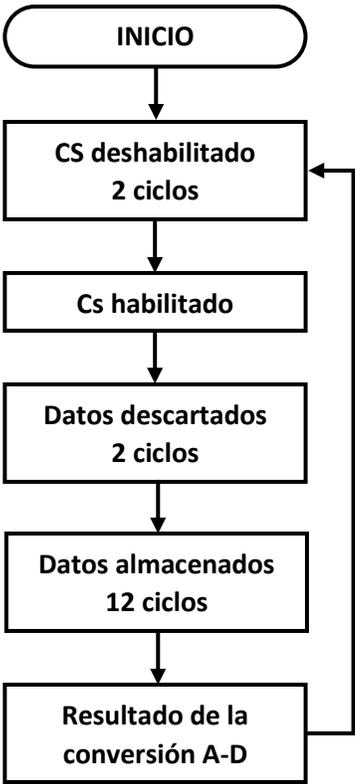


Figura 28. Diagrama de flujo para adquisición de datos

Los resultados de la simulación del algoritmo abordado previamente se muestran en la Figura 29. En el esquema se observa la señal de reloj spi\_clk, recibida desde el bloque de escalamiento y una señal de prueba aplicada a la entrada de datos de la comunicación SPI en la terminal doa, con un periodo 4 veces mayor al periodo del reloj, que representa la información enviada por el convertidor analógico-digital.

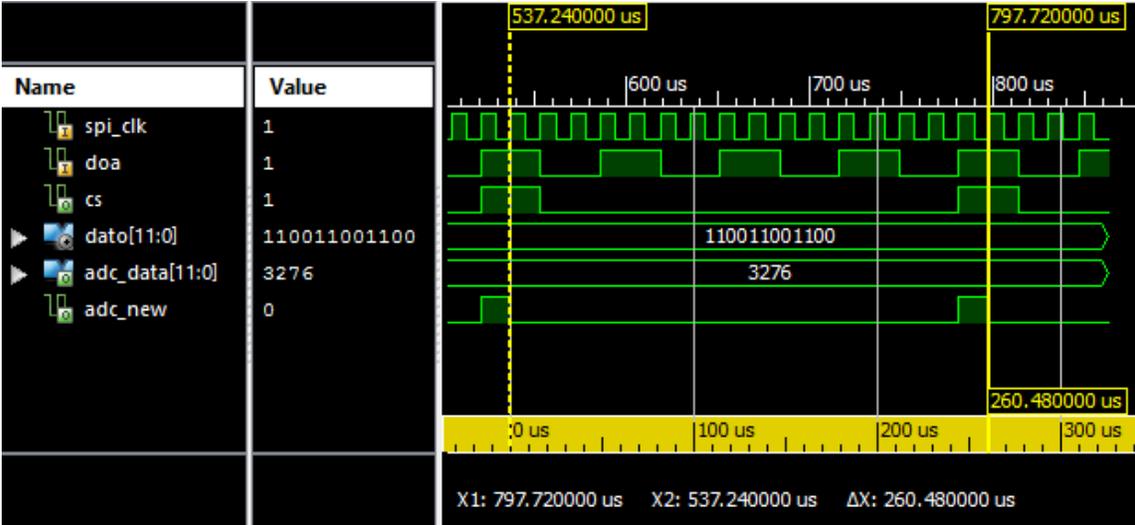


Figura 29. Diagrama de tiempo para adquisición de datos

A la salida se registra el valor recuperado de la muestra recién obtenida, con un valor en binario de 110011001100 y su equivalente decimal de 3276. Esta muestra se actualiza cada 260.48 microsegundos y, al término década ciclo, se activa la señal adc\_new durante un ciclo de reloj para informar a los siguientes bloques de la nueva adquisición.

### 3.3 VALOR DE LA RAÍZ DE LA MEDIA CUADRÁTICA (RMS)

Para realizar la detección de disturbios en el suministro eléctrico es complicado analizar la señal en corriente alterna original debido a que se parte de una onda senoidal. Lo más práctico consiste en cuantificar un equivalente en corriente directa.

Para este propósito se obtiene el valor de la raíz de la media cuadrática, rms o valor eficaz, que representa el nivel de voltaje directo que al ser aplicado en una carga resistiva genera el mismo consumo de potencia que un voltaje alterno.

El valor rms se calcula por medio de la siguiente fórmula, para una señal en tiempo continuo (Joao, Batista, & Sepúlveda, 2003).

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} * \int_0^T |v(t)|^2 * dt} \quad (9)$$

En el caso de la señal en tiempo discreto, el análisis de las muestras se realiza con base en la siguiente expresión.

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N v_i^2} \quad (10)$$

El algoritmo para la obtención del voltaje eficaz se diseña basado en el diagrama de flujo mostrado en la Figura 30.

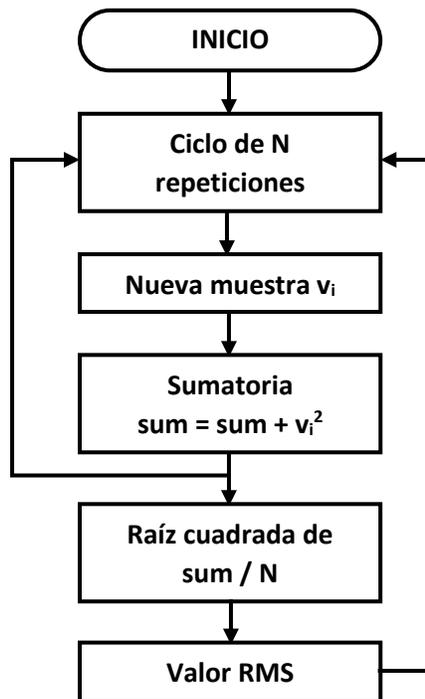


Figura 30. Diagrama de flujo para obtener el valor RMS

Para observar el funcionamiento del algoritmo se simula por medio de la interfaz gráfica del programa LabVIEW que permite generar un bloque de datos que servirán como las muestras adquiridas para después pasar por el algoritmo generado para obtener el valor rms de la señal de entrada simulada.

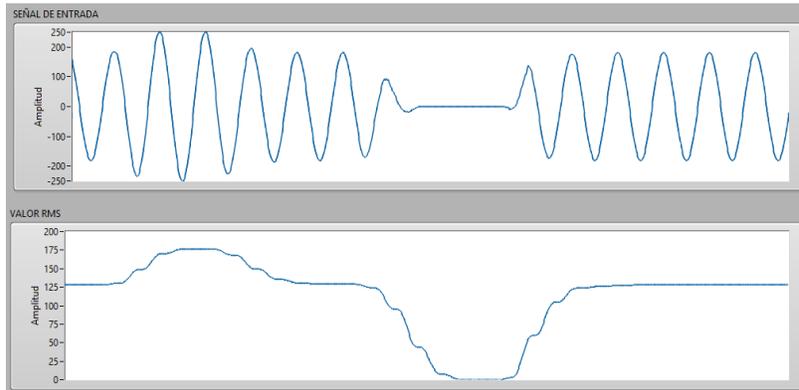


Figura 31. Simulación del algoritmo para obtener valor rms

En la Figura 31 se muestra la simulación para una señal senoidal con frecuencia de 60 hz, aplicando variaciones en la amplitud de la onda para comprobar el cambio del valor eficaz calculado. En el gráfico del valor rms se nota el cambio en la magnitud durante las variaciones y permanece constante en el resto del tiempo.

Después se implementa el código en VHDL para simular el algoritmo trabajando en el fpga. En la Figura 32 se muestra el diagrama de tiempo con la adquisición de datos en la señal adc\_data, en el periodo de muestreo designado previamente y la señal vrms devolviendo el valor eficaz calculado.

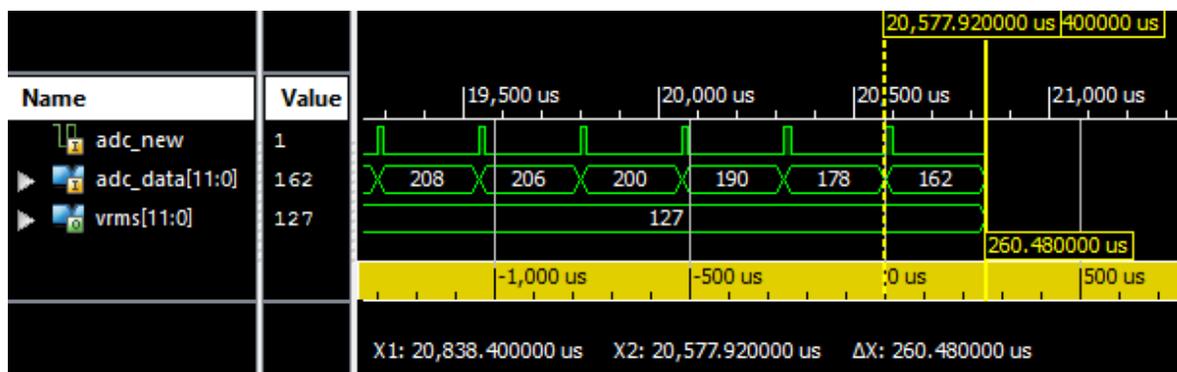


Figura 32. Diagrama de tiempo del cálculo del valor rms

### 3.4 DETECCIÓN DE EVENTOS

El proceso para detectar eventos consiste en monitorear el valor rms de la señal y verificar que se mantenga dentro de un rango establecido. El límite de variaciones permitidas, así como la duración, son parámetros tomados de lo que indica la normatividad.

El algoritmo para la detección de eventos se muestra en la Figura 33. Al sobrepasar uno de los límites se almacena una marca de tiempo inicial. Después de que el valor regresa al margen admisible, se guarda la duración del evento en milisegundos.

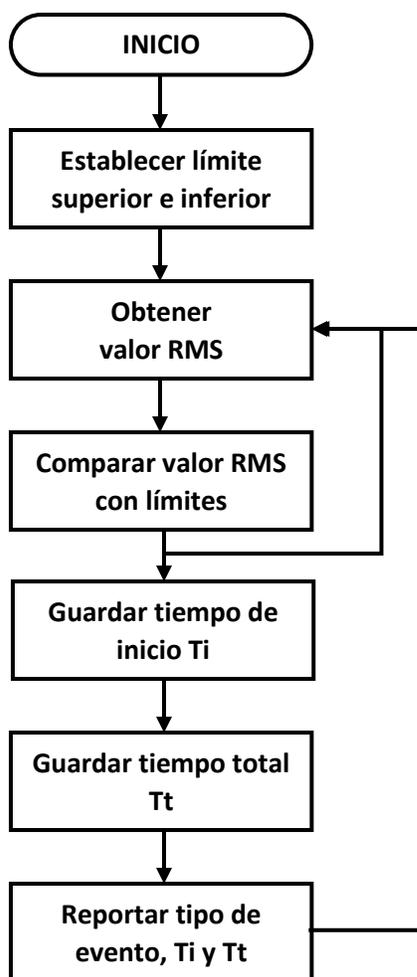


Figura 33. Diagrama de flujo de algoritmo para detección de eventos

Se contemplan dos valores para los límites. Cuando el valor rms sobrepasa el límite superior se reporta un sag y cuando es menor al límite inferior se reporta un swell.

En la Figura 34 se muestra la simulación del código para la detección de eventos. En el diagrama se observan los valores de tiempo en milisegundos del instante en el que inició la variación y la duración que tuvo. Comparados con la escala de tiempo de la simulación se puede notar que los valores coinciden. Al finalizar el evento se habilita la señal evento\_new durante un ciclo de reloj para informar que se tiene un registro pendiente.

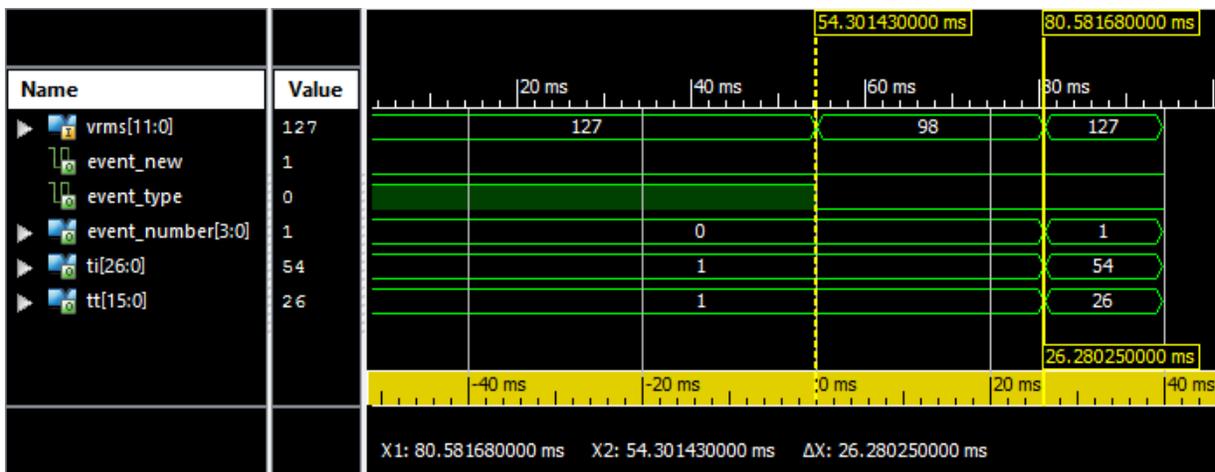


Figura 34. Diagrama de tiempo del bloque para detección de eventos

Además de las marcas de tiempo del disturbio, también se envía una señal indicando el tipo de evento que acaba de ocurrir, así como el número de eventos que se han presentado.

### 3.5 MEDICIÓN DE ARMÓNICOS

Para la determinación de la magnitud de los armónicos, presentes en el suministro eléctrico, se realiza un análisis del espectro de frecuencia de la onda. Para este objetivo se emplea la descomposición de la función original por medio de la

transformada de Fourier que se representa por medio de la siguiente ecuación aplicada a una señal continua (Biletskiy, Nanacekivell, Chang, & Riming, 2017).

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) * e^{-j\omega t} dt \quad (11)$$

Para un sistema digital, en el que la adquisición de la señal de entrada se realiza a través de un bloque de muestras, se debe aplicar la transformada discreta de Fourier DFT.

$$Y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} v(n)W_N^{kn} \quad (12)$$

$$W_N = e^{-i2\pi/N} \quad (13)$$

Expandiendo la representación de Euler a una serie de senos y cosenos la relación para obtener la transformada rápida de Fourier FFT aplicada a la señal discreta se modifica de la siguiente manera.

$$Y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} v(n) * e^{-i2\pi kn/N} \quad (14)$$

$$e^{-i\theta} = \cos \theta - i \text{sen } \theta \quad (15)$$

$$Y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} v(n) * [\cos (2\pi kn/N) - i \text{sen } (2\pi kn/N)] \quad (16)$$

Para la implementación de la FFT se toma una ventana de N datos adquiridos. El tamaño de este bloque de datos se mencionó en la sección de muestreo. El índice  $k$  define el orden del componente de frecuencia que se quiere conocer. El  $k$ -ésimo valor de frecuencia está definido por:

$$f_k = k * \frac{f_s}{N} \quad (17)$$

Sustituyendo los parámetros asignados:

$$f_k = k * \frac{3840}{64} \quad (18)$$

$$f_k = k * 60 \quad (19)$$

Con esto el índice  $k$  representa un múltiplo de la frecuencia de 60 Hz, es decir, el orden del armónico que se requiere cuantificar.

Para implementar la FFT se desarrolla el algoritmo que se muestra en la Figura 35. Básicamente consiste en la adquisición de la ventana de  $N$  muestras y su procesamiento en dos ciclos. El primero realiza la sumatoria de las muestras ponderadas y el segundo hace el barrido para los valores de  $k$ .

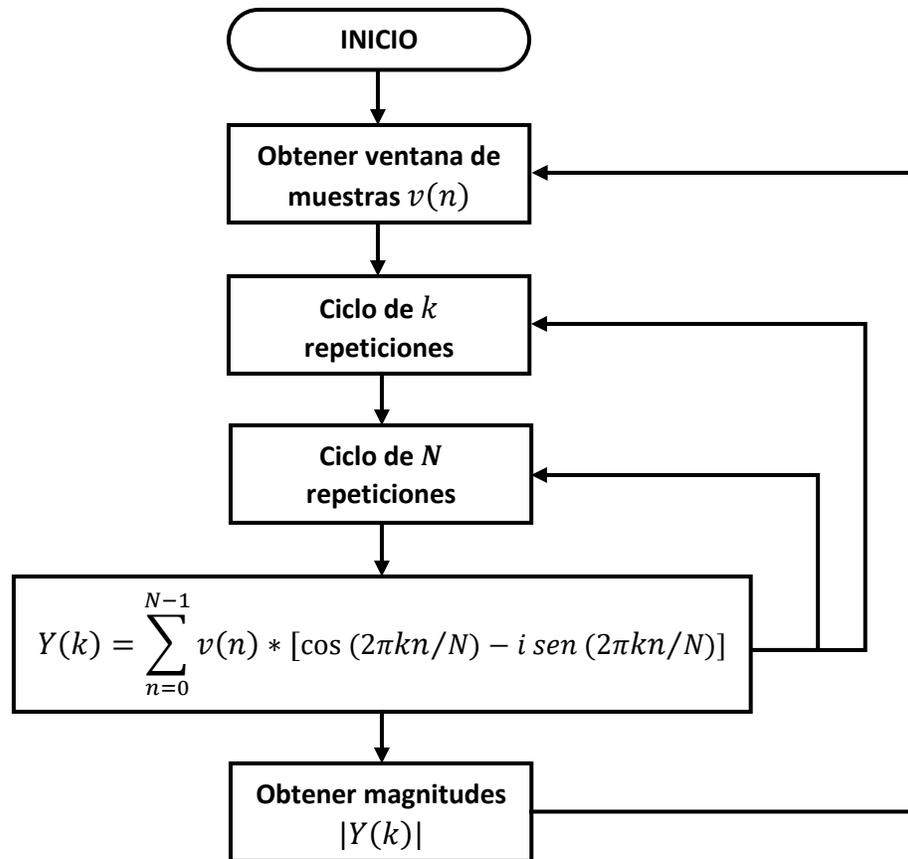


Figura 35. Diagrama de flujo de algoritmo para cálculo de armónicos

Este algoritmo es simulado generando una señal de prueba con la incorporación de armónicos de diferentes magnitudes. En la Figura 36 se muestra el resultado de la simulación. Los niveles de la parte superior permiten modificar las amplitudes de los armónicos insertados. En el primer gráfico se registra la ventana de datos adquiridos  $v(n)$  y en el segundo  $|Y(k)|$  se obtiene el resultado de la aplicación del algoritmo para el cálculo de armónicos.

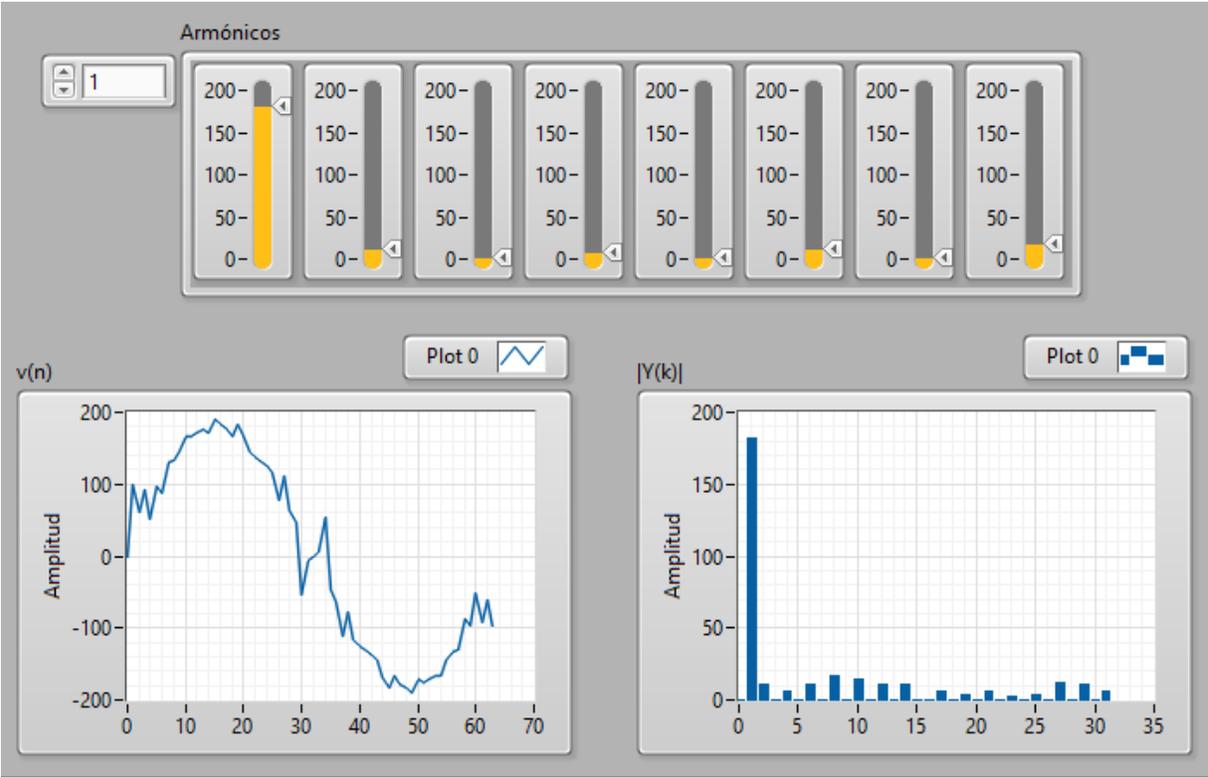


Figura 36. Simulación de algoritmo para cálculo de armónicos

### 3.6 GENERACIÓN DE REPORTE

Una vez que la señal ha sido analizada por medio de los algoritmos, se requiere mostrar los resultados al usuario. En la sección de la selección de hardware se mencionan los tres modos de despliegue de información: básico, gráfico y comunicación.

El despliegue básico de la detección de eventos se encuentra disponible en todo momento. Las otras dos modalidades pueden ser habilitadas para monitorear con mayor detalle la detección de perturbaciones y para la medición de armónicos. En la Figura 37 se ilustra el esquema de selección de modo y en la Tabla 8 se enlistan las opciones disponibles.

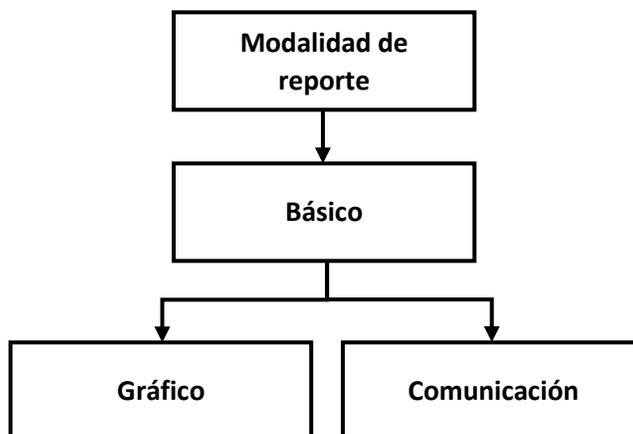


Figura 37. Modalidades de reporte de resultados

Tabla 8. Prestaciones en las tres modalidades

<b>Modo</b>	<b>Básico</b>	<b>Gráfico</b>	<b>Comunicación</b>
Detección del último evento	SI	SI	SI
Marca de tiempo del evento	SI	SI	SI
Historial de eventos	NO	SI	SI
Armónicos	NO	SI	SI
Despliegue simultáneo eventos/armónicos	NO	NO	SI

### 3.6.1 Reporte básico

En el modo básico se hace uso de las señales provenientes del bloque de detección de eventos. Al recibir el indicador de “nuevo evento detectado” se toman los valores del tiempo inicial, duración y tipo. Con estos datos se muestra la información al usuario del último disturbio que se ha presentado y se queda en espera de un nuevo reporte. Cada perturbación detectada va reemplazando a la anterior, es decir, solo se muestra el último registro realizado. La Figura 38 muestra el proceso para el despliegue básico de eventos detectados.

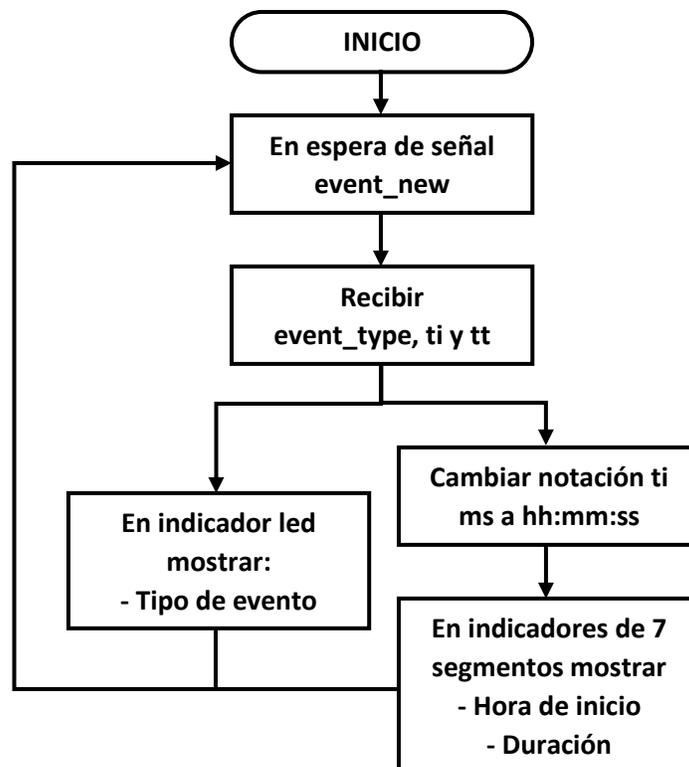


Figura 38. Diagrama de flujo para reporte básico de eventos

En la Figura 39 se muestra un esquema con la ubicación de los elementos que se emplean para mostrar la información. El tipo de evento se muestra por medio de la activación de indicadores luminosos. El led izquierdo se enciende cuando el último evento detectado es un SAG de voltaje, y el derecho se activa cuando ha ocurrido un SWELL.

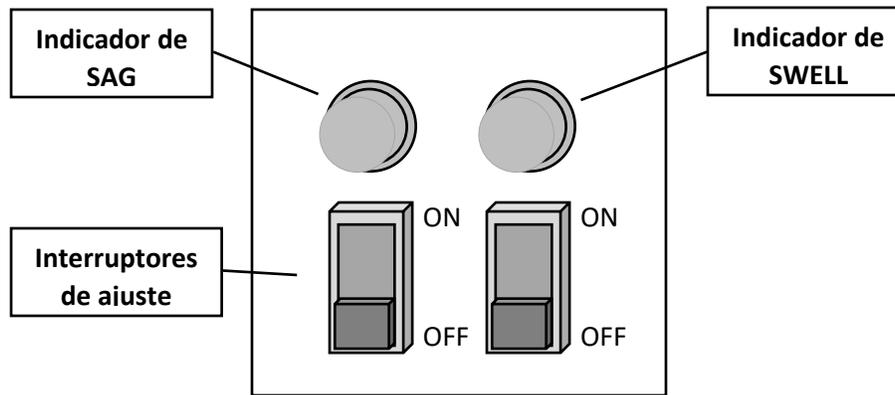


Figura 39. Indicadores de tipo de evento

La información de tiempo se despliega en el bloque de 4 display de 7 segmentos. En esta etapa se requiere mostrar la etiqueta de tiempo en el que ocurrió el disturbio y su duración por lo que se hace uso de los interruptores para cambiar el dato que se visualiza.

El registro de tiempo de inicio del disturbio “ $t_i$ ”, desde el algoritmo de detección de eventos, se encuentra en el orden de milisegundos por lo que es cambiado a un formato de horas, minutos y segundos para una mejor representación.

$$hh = \text{round} \left( \frac{t_i}{3.6 \times 10^6} \right) \text{ horas} \quad (20)$$

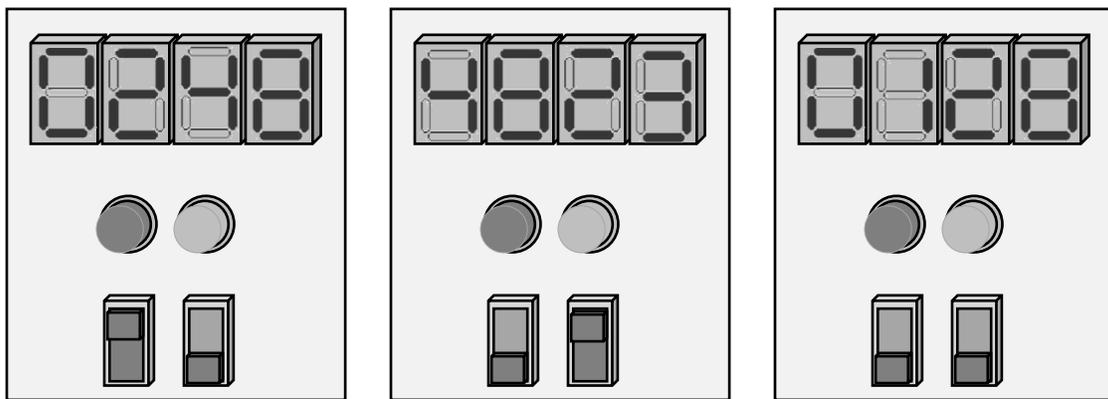
$$mm = \text{round} \left( \frac{t_i \bmod (3.6 \times 10^6)}{6 \times 10^4} \right) \text{ minutos} \quad (21)$$

$$ss = \text{round} \left( \frac{[t_i \bmod (3.6 \times 10^6)] \bmod (6 \times 10^4)}{1 \times 10^3} \right) \text{ segundos} \quad (22)$$

En el caso de la duración del evento el valor máximo que permiten mostrar los 4 display es de 9,999 por lo que se convierte la cantidad de milisegundos de la señal de tiempo total  $t_t$  a centésimas de segundo, esto debido a que el rango máximo que se puede considerar para una variación momentánea del suministro eléctrico es de un minuto,

es decir, 6,000 centésimas de segundo, por lo que se adapta a los indicadores disponibles.

En la Figura 40 se puede observar la configuración de los interruptores para desplegar la hora y el minuto del tiempo de inicio, el minuto y segundos del mismo y en la tercera opción se muestra la duración total en centésimas de segundo. En el ejemplo de la Figura 40 se estaría reportando un swell que ocurrió a las 2:48:23 hrs. y tuvo una duración de 1.28 segundos.



*Figura 40. Configuraciones para presentar datos de un evento ocurrido*

### **3.6.2 Reporte gráfico**

Para la representación gráfica de los resultados se envían los datos de salida de los algoritmos aplicados a la señal de origen para mostrarlos en la pantalla. De manera similar al modo básico, se utilizan interruptores para cambiar la información que se visualiza, debido a que se requiere desplegar tanto la detección de eventos, así como la distorsión armónica. En la Figura 41 se muestra un esquema de los bloques de programa y las señales que intervienen en las diferentes opciones de despliegue de resultados por medio de la pantalla.

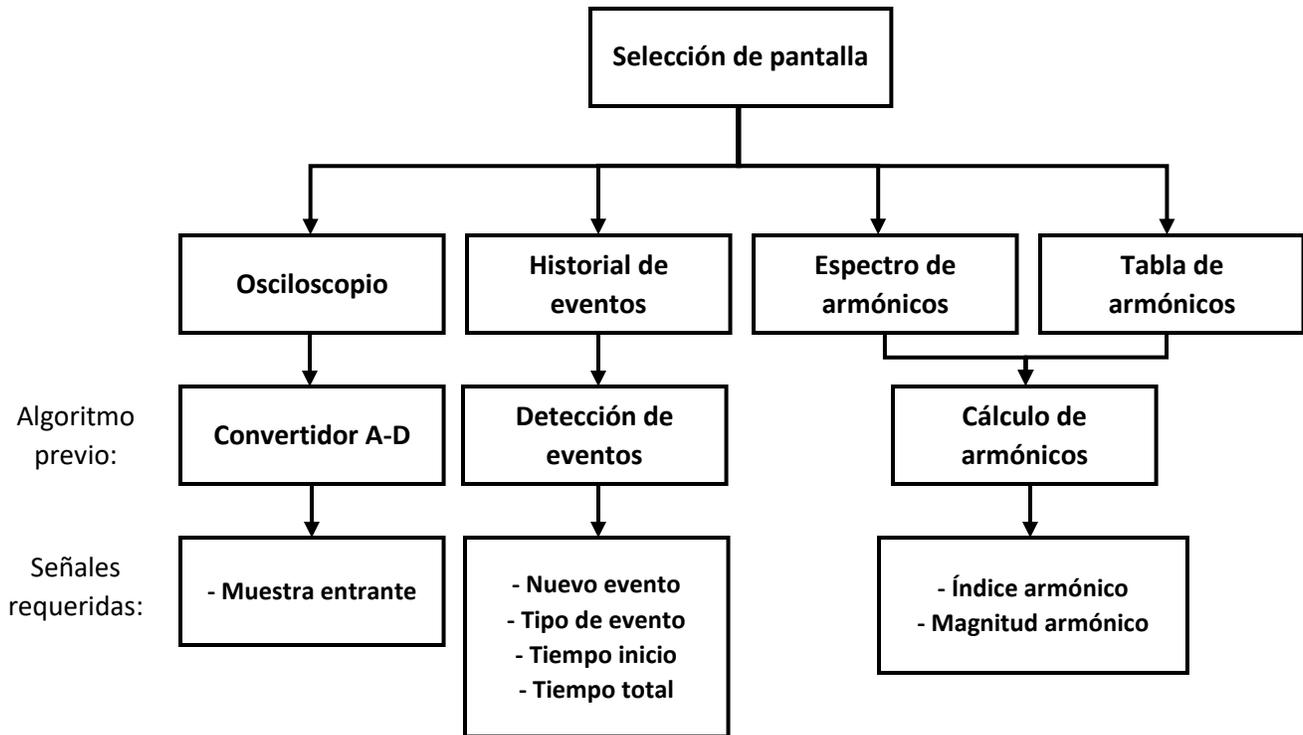


Figura 41. Esquema de opciones de despliegue gráfico de resultados

En la opción de osciloscopio no se realiza ningún cálculo sobre los datos de la señal, simplemente tiene el objetivo de desplegar la adquisición de entrada para poder monitorear algún defecto en la forma de onda. Las muestras registradas por el convertidor analógico digital son graficadas en un plano de amplitud y tiempo, como se observa en la Figura 42.

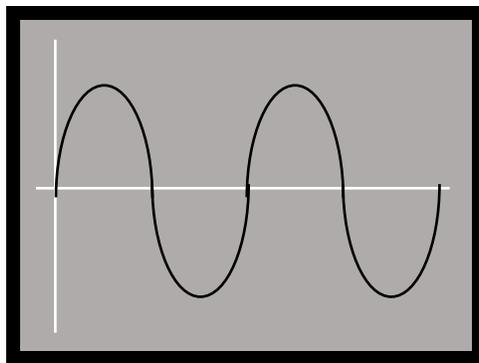


Figura 42. Pantalla de opción "osciloscopio"

Para el historial de eventos se reciben los resultados del algoritmo para detección de disturbios. Cada vez que se activa la señal de nuevo evento detectado, se van registrando las características de la perturbación en forma de listado. En la pantalla se muestran las columnas de número de evento, tipo, tiempo de inicio y duración (Figura 43).

Evento	Tipo	Inicio	Duración
1	SAG	2:48:23	128
2	SWELL	14:43:48	2345
3	SWELL	16:32:03	1230

Figura 43. Pantalla en opción de “historial de eventos”

Para la representación de la distorsión armónica se toma la información proveniente del algoritmo basado en la transformada rápida de Fourier. En este caso existen dos posibilidades de observar los datos en la pantalla.

La primera forma consiste en el despliegue del espectro de frecuencias múltiplo de la frecuencia fundamental de 60 Hz. La magnitud de cada armónico se representa gráficamente en el plano de frecuencia contra amplitud como se observa en la Figura 44.

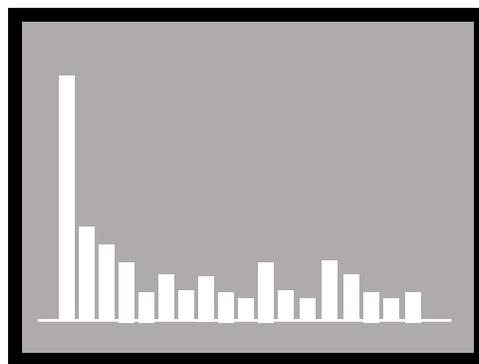


Figura 44. Pantalla de opción de “espectro de armónicos”

La segunda posibilidad ofrece la misma información, pero en formato de tabla (Figura 45). Con las columnas de índice y magnitud se registra la medición de las primeras 31 componentes armónicas presentes en la señal de entrada.

k	mag	k	mag
0	1	16	23
1	180	17	12
2	24	18	13
3	12	19	10
4	10	20	9
5	2	21	2
6	3	22	32
7	10	23	21
8	3	24	18

Figura 45. Pantalla de opción de “tabla de armónicos”

### 3.6.3 Interfaz de comunicación

La tercera opción de reporte habilita el puerto USB para la transmisión de información hacia un dispositivo externo, como lo ilustra el esquema de la Figura 46. Por medio de una computadora personal se reciben los datos y se presentan al usuario a través de una interfaz gráfica.

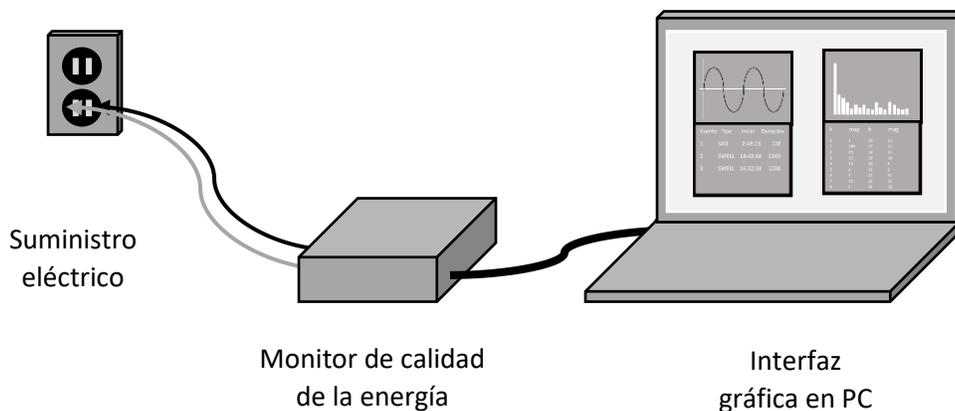


Figura 46. Comunicación entre monitor de calidad de la energía y una PC

Los resultados obtenidos por los algoritmos aplicados a la señal de entrada son empaquetados para su envío del FPGA hacia la computadora, utilizando un módulo de comunicación basado en el protocolo de Transmisión-Recepción Asíncrona Universal UART. En la Figura 47 se muestra la secuencia para transmisión de datos.

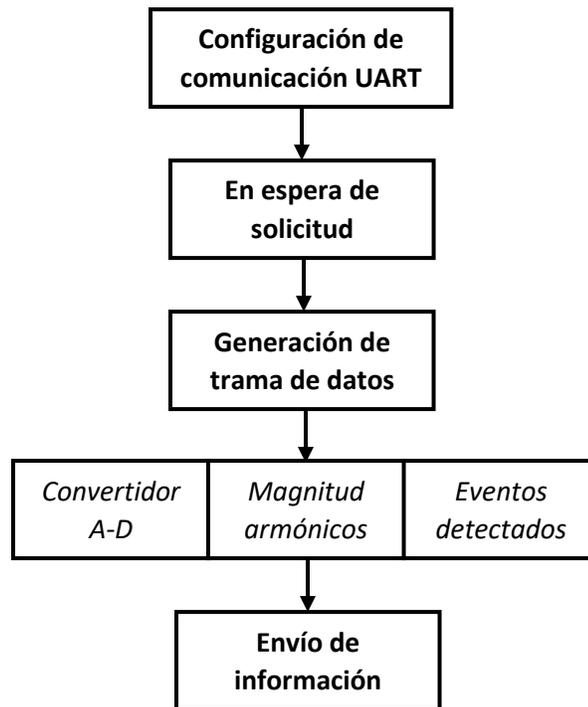


Figura 47. Secuencia para envío de datos

## CAPÍTULO IV. PRUEBAS Y RESULTADOS

### 4.1 DESCRIPCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS

Para la verificación del funcionamiento de la plataforma de medición de calidad de la energía, se implementa una serie de pruebas por medio de variaciones en parámetros como amplitud, forma de onda o frecuencia de la señal de entrada. Los resultados son comparados con mediciones realizadas con instrumentos comerciales. El esquema de configuración para la plataforma experimental se muestra en la Figura 48.

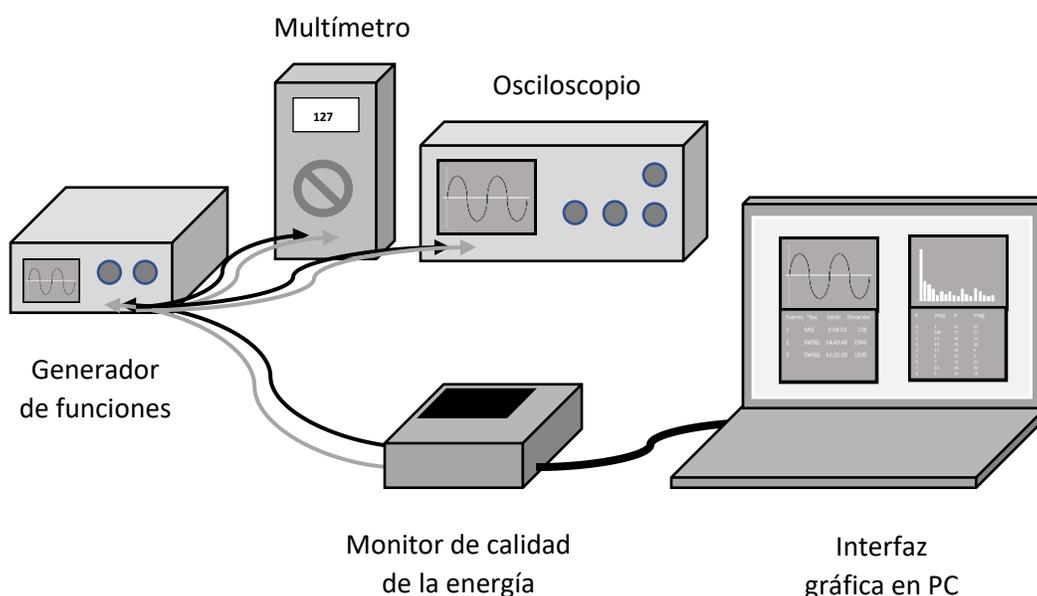


Figura 48. Esquema de plataforma experimental

#### 4.1 Equipo para mediciones

##### 4.1.1 Multímetro

Este equipo (Figura 49) se utiliza para realizar mediciones básicas como el voltaje en corriente directa o incluso el voltaje rms. Estos valores permiten observar la variación para poder llevar a cabo una posible calibración. Este instrumento tiene la capacidad de medir las siguientes magnitudes físicas:

- Voltaje directo
- Voltaje alterno
- Corriente directa
- Corriente alterna
- Resistencia eléctrica
- Continuidad
- hFE



*Figura 49. Multímetro*

#### **4.1.2 Generador de funciones**

Para la señal de entrada de la plataforma se emplea el generador de funciones Wave Station 2022 de Teledyne Lecroy (Figura 50), con las siguientes características (Teledyne Lecroy, 2013):

- 2 canales de salida de conector BNC
- 5 formas de onda básicas
- Rango de frecuencia de 1uHz a 25 Mhz
- Distorsión armónica menor al 0.2%
- Esquemas de modulación como AM, FM, PSK, entre otros.
- Nivel de voltaje compatible con TTL
- Amplitud de salida de 2mVpp a 10Vpp con resolución de 1mV
- Rango de offset de +/- 10 Vdc
- Protección contra corto circuito



*Figura 50. Generador de funciones Wave Station 2022*

#### **4.1.3 Osciloscopio digital**

El modelo de osciloscopio es el Tektronix TBS1102B/EDU (Figura 51) que cuenta con las siguientes prestaciones (Tektronix):

- Ancho de banda de 100MHz
- Velocidad de muestreo de cada canal de 2 GS/s
- Longitud de registro de 2500 puntos
- Acoplamiento de entrada en CC, CA o tierra
- Funciones matemáticas como suma, resta, multiplicación y FFT
- Botón de autoconfiguración
- Medición de amplitud, periodo, frecuencia, rms, entre otros.



*Figura 51. Osciloscopio Tektronix TBS1102B/EDU*

## 4.2 SEÑALES DE TIEMPO

### 4.2.1 Pulsos de reloj

Para verificar la sincronía adecuada del FPGA con el Convertidor analógico-digital, se habilita una terminal de salida digital con la señal de pulsos de reloj generados por el bloque de escalamiento en el FPGA.

En la Figura 52 se muestra el resultado de la medición de la señal de reloj, con una frecuencia de 61.42 kHz y periodo de 16.28  $\mu$ s, que corresponden con los parámetros previamente calculados.

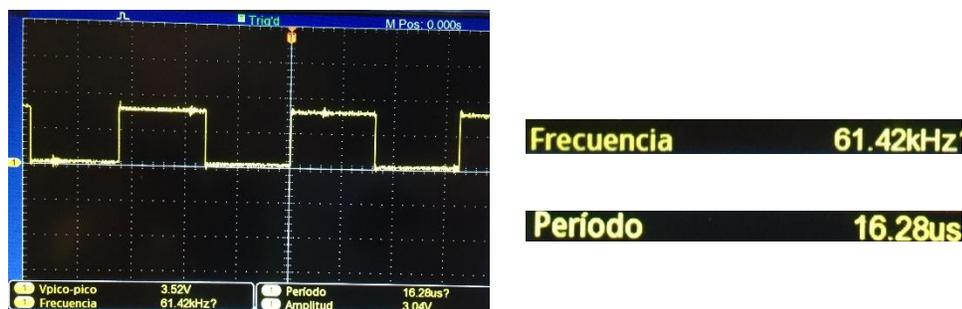


Figura 52. Señal de reloj escalada

### 4.2.2 Reloj de 24 horas

Para tomar las marcas de tiempo en el que ocurren los eventos detectados, se crea un bloque que contabiliza la cantidad de milisegundos que han transcurrido. Después se traduce este dato a un formato de horas, minutos y segundos para cotejarlo con un reloj independiente.

En la Figura 53 se muestra el esquema de configuración del FPGA para la realización de esta prueba.



Figura 53. Esquema de configuración para prueba de reloj de 24 hrs.

Para esta prueba también se agregó el código para la activación de los displays de 7 segmentos que permiten la visualización de la información. Para comprobar el funcionamiento se utiliza el reloj de la computadora, comparando la hora marcada en ambos dispositivos en diferentes lapsos de tiempo. En la Figura 54 se observa el dato correspondiente.



Figura 54. Sincronización de reloj de 24 hrs

### 4.3 MEDICIÓN DE VOLTAJE

La siguiente prueba a realizar es la adquisición de entrada por medio del ADC. La muestra adquirida es monitoreada por medio de los displays de 7 segmentos, mostrando el valor obtenido del circuito convertidor o el escalamiento realizado para traducir el dato al nivel de voltaje que corresponde. La Figura 55 muestra los bloques que intervienen.

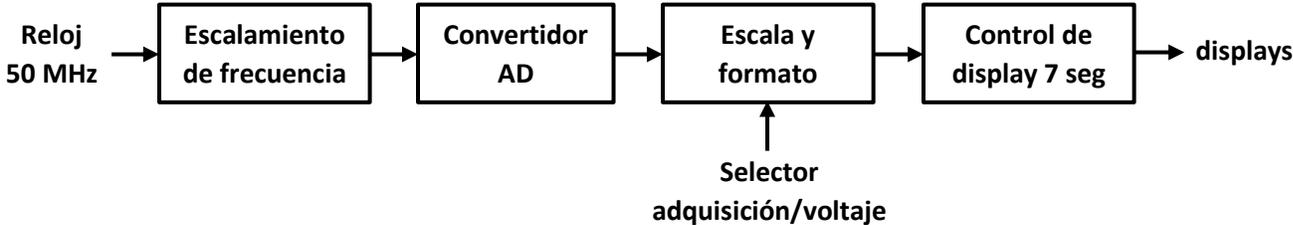


Figura 55. Esquema de configuración para prueba de adquisición con adc

Los resultados de esta prueba mostraron una desviación en comparación con los datos obtenidos al realizar la medición con un voltímetro, como se observa en el gráfico de la Figura 56.

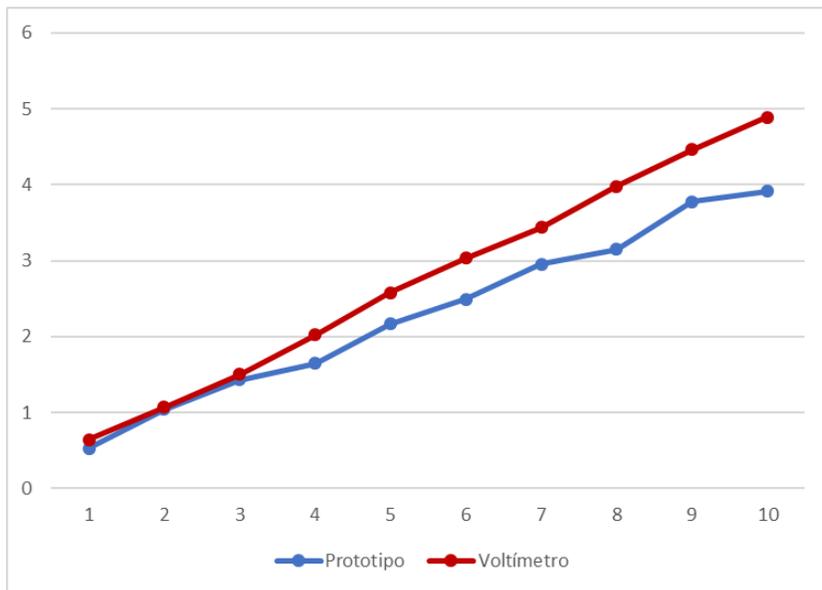


Figura 56. Comparación de lectura de voltaje con el prototipo y voltímetro

La serie de datos muestra una diferencia proporcional, por lo que se realiza una modificación en el valor del voltaje de referencia utilizado por el ADC. En la Figura 57 se muestra el resultado de una de las mediciones antes y después de la corrección.



Figura 57. Lectura de voltaje inicial y corregida

## 4.4 MEDICIÓN DE VALOR RMS

De manera similar al proceso realizado con la adquisición, se implementa la configuración mostrada en la Figura 58 para monitorear el valor eficaz.

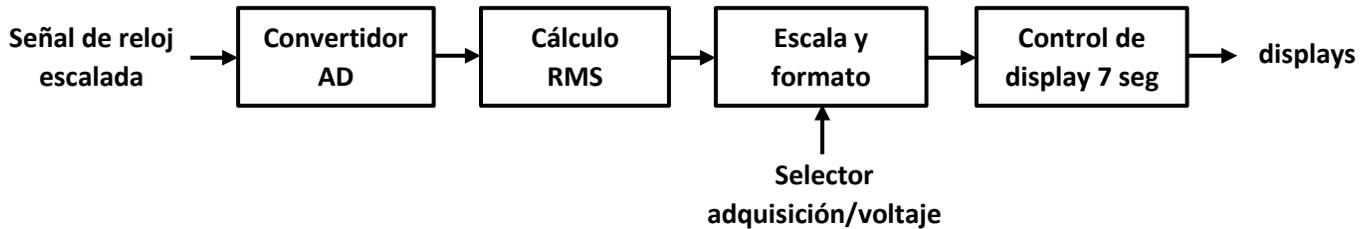


Figura 58. Esquema de configuración para prueba de valor rms

A diferencia de la prueba anterior, realizada con una entrada de voltaje constante, en este caso se genera una señal senoidal de 60 Hz con un offset de 2.5 volts.

El valor de la raíz de la media cuadrática calculado por el fpga es comparado con la información del multímetro y del osciloscopio.

Variando la amplitud de la onda de entrada se toma la lectura de una serie de valores rms, obteniendo una diferencia menor al 5%, con respecto a los instrumentos. En la Figura 59 se muestra parte de la prueba.

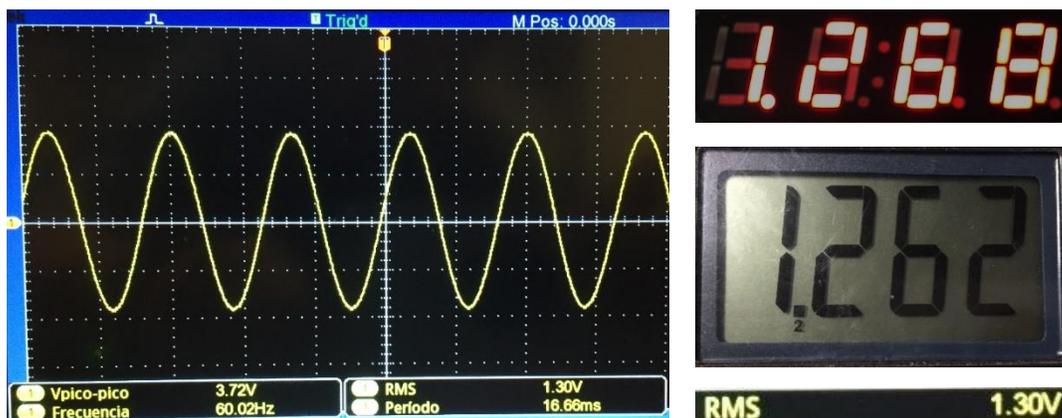


Figura 59. Lectura de valor rms en prototipo, voltímetro y osciloscopio

## 4.5 GRÁFICO DE FORMA DE ONDA

La siguiente fase de pruebas utiliza la pantalla destinada al modo gráfico y la comunicación para la modalidad de interfaz con la computadora. El esquema implementado se muestra en la Figura 60.

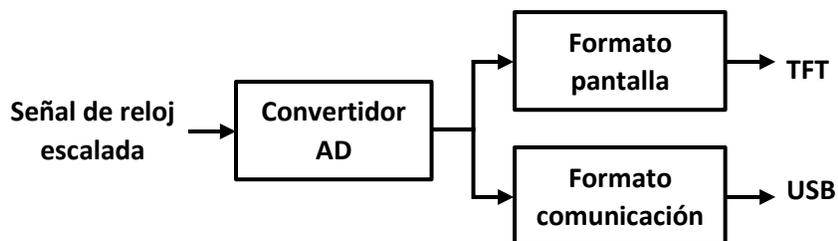


Figura 60. Esquema de configuración para prueba de gráfico de forma de onda

Empleando el generador de funciones se producen diferentes señales variando parámetros como forma de onda, amplitud y frecuencia. Las muestras obtenidas en la adquisición son procesadas y mostradas en la tft, además de ser transmitidas a la interfaz de la PC. En la Tabla 9 se enlistan las características de las señales utilizadas en la prueba y sus resultados son mostrados en la Figura 61 y Figura 62.

Tabla 9. Pruebas de gráfico de forma de onda

Prueba	Forma de onda	Amplitud	Frecuencia	Periodo
1	Senoidal	1 v	100 Hz	10 mS
2	Triangular	2 v	200 Hz	5 mS
3	Cuadrada	1.5 v	40 Hz	25 mS

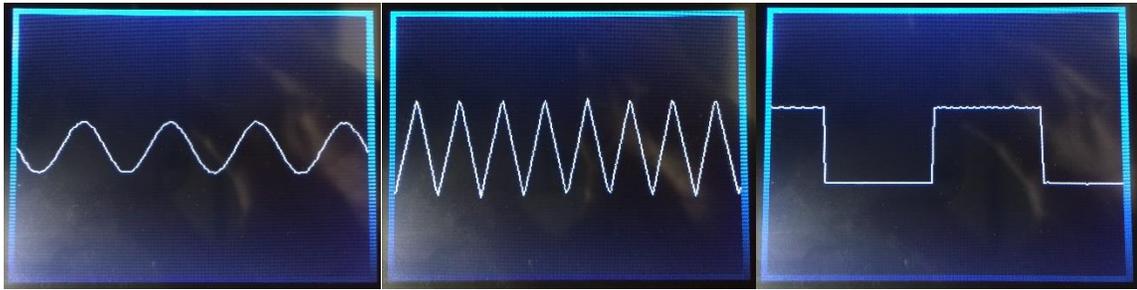


Figura 61. Formas de onda graficadas en pantalla del prototipo

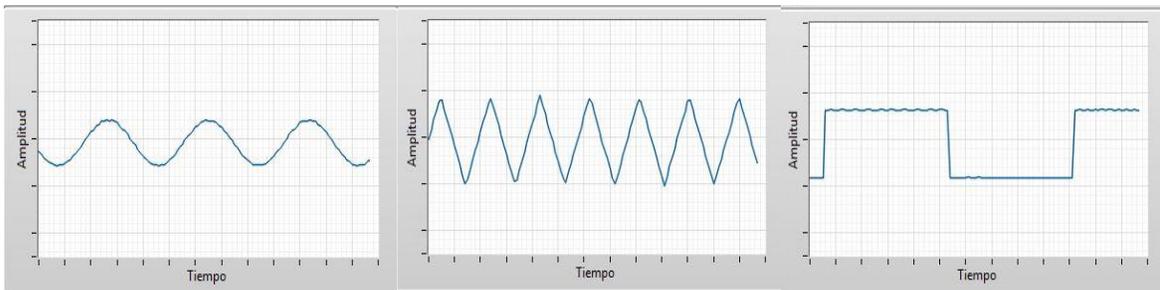


Figura 62. Formas de onda graficadas en la interfaz de computadora

Dentro de las pruebas se observa que al aumentar la frecuencia comienza a distorsionarse la forma de la señal, debido a la velocidad de muestreo que se emplea, como se observa en la Figura 63. Sin embargo, es importante resaltar que la plataforma está diseñada para monitorear el suministro eléctrico con una frecuencia prácticamente constante.

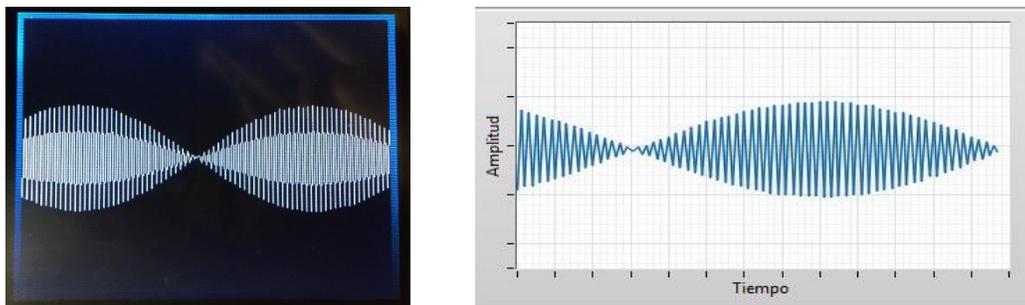
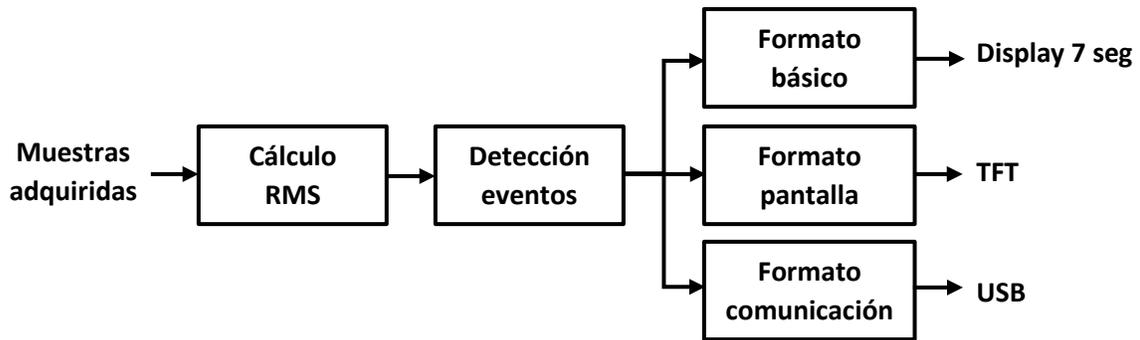


Figura 63. Deformación del gráfico de la onda por elevada frecuencia

## 4.6 DETECCIÓN DE EVENTOS

Después de haber probado la lectura del valor rms, se verifica la detección de disturbios y su respectivo reporte en las 3 modalidades. En la Figura 64 se muestra la configuración implementada.



*Figura 64. Esquema de configuración para prueba de detección de eventos*

Se toma en consideración la escala de 10:1 de la señal de entrada y el nivel de offset. Los rangos de amplitud y tiempo son configurados de acuerdo a lo que indica la normatividad.

Al generar una subida o un decaimiento en la amplitud de la onda, y su respectiva recuperación dentro del rango permitido, se reporta la perturbación por medio de los indicadores led especificando el tipo de evento, mientras que en los displays de 7 segmentos se despliega el tiempo de duración en milisegundos o la hora de inicio. En la Figura 65 se muestra la detección de un swell ocurrido a las 19:44:02 con una duración de 18.288 segundos



*Figura 65. Reporte de evento detectado modo básico*

En el modo básico se despliega el último disturbio ocurrido, pero en la pantalla del prototipo se muestra el historial, con un listado de los detalles, como se observa en la Figura 66.

No.	Tipo	Inicio	Total
1	SAG	19:28:34	5484
2	SAG	19:39:40	183
3	SAG	19:41:17	17
4	SWELL	19:44:02	18288

Figura 66. Historial de eventos detectados modo gráfico

De igual manera ocurre en la modalidad de interfaz con la PC en donde otra de las prestaciones es que se puede monitorear la tendencia en el valor eficaz, por lo que se puede tener una descripción gráfica de la perturbación (Figura 67).

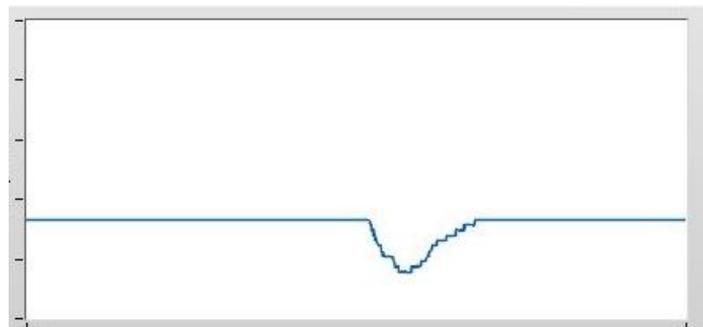


Figura 67. Gráfico de valor rms en reporte modo comunicación

#### 4.7 MEDICIÓN DE ARMÓNICOS

La última función comprobada es el cálculo de la magnitud de los componentes armónicos por medio de la transformada rápida de Fourier. El esquema de código del sistema se muestra en la Figura 68.

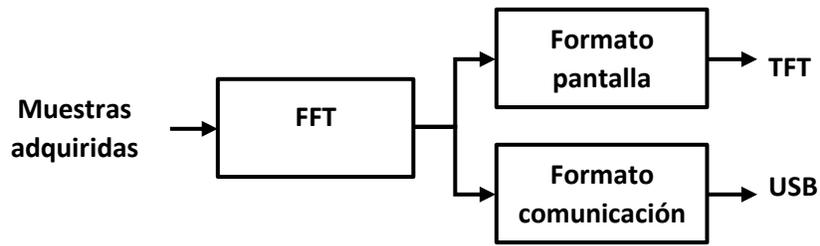


Figura 68. Esquema de configuración para prueba de medición de armónicos

Esta etapa se lleva a cabo con un barrido de frecuencias desde 60 Hz hasta 1860 Hz que corresponde al armónico número 31. En la Figura 69 y Figura 70 se muestra parte del resultado, con el despliegue gráfico del espectro de armónicos tanto en la pantalla del dispositivo como en la computadora.

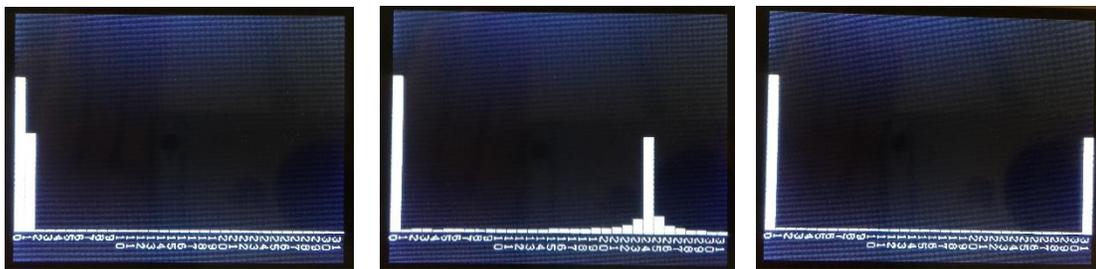


Figura 69. Espectro de armónicos en pantalla del prototipo

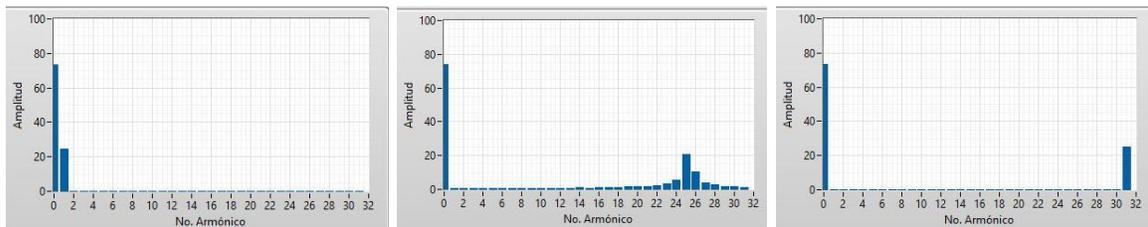


Figura 70. Espectro de armónicos en interfaz de computadora

El resultado obtenido es comparado con la función FFT del osciloscopio en donde los valores de las frecuencias múltiplo de la frecuencia fundamental corresponden con los calculados por el prototipo, como se observa en la Figura 71.

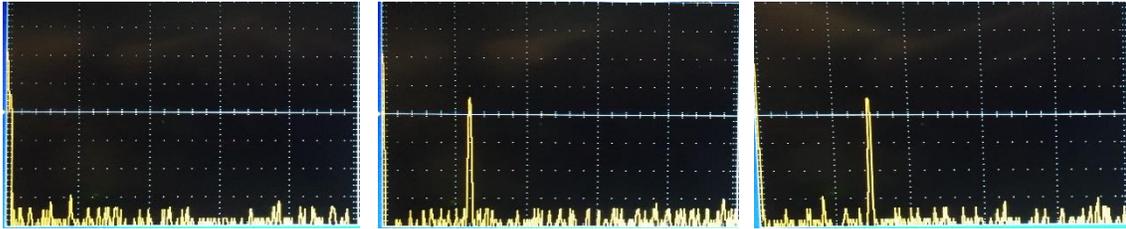


Figura 71. FFT de osciloscopio

Estos mismos datos son utilizados para mostrar la información, pero en formato de tabla, desplegando el índice del armónico y su respectiva magnitud (Figura 72).

0 Hz	73.63	960 Hz	0.10
60 Hz	46.97	1020 Hz	0.09
120 Hz	0.09	1080 Hz	0.14
180 Hz	0.20	1140 Hz	0.05
240 Hz	0.12	1200 Hz	0.03
300 Hz	0.18	1260 Hz	0.09
360 Hz	0.11	1320 Hz	0.12
420 Hz	0.08	1380 Hz	0.08
480 Hz	0.02	1440 Hz	0.06
540 Hz	0.08	1500 Hz	0.10
600 Hz	0.15	1560 Hz	0.09
660 Hz	0.05	1620 Hz	0.06
720 Hz	0.13	1680 Hz	0.13
780 Hz	0.08	1740 Hz	0.09
840 Hz	0.19	1800 Hz	0.06
900 Hz	0.12	1860 Hz	0.07

Figura 72. Tabla de magnitud de armónicos

## CONCLUSIONES

El presente trabajo describe el diseño a nivel de hardware y software de una plataforma para medición de calidad de la energía eléctrica, basado en el fpga Spartan 6.

Este proyecto fue concluido y presentado a nivel prototipo con las características planteadas en los objetivos. El equipo es capaz de leer una señal de entrada con forma de onda senoidal y frecuencia de 60 Hz, la cual es procesada por diferentes algoritmos.

El dispositivo es capaz de detectar anomalías en el nivel rms de la onda y clasificar el tipo de disturbio ocurrido con base en la normatividad. La detección de sag y swell es presentada al usuario por medio de indicadores led y display de 7 segmentos para mostrar la hora en que ocurrió el fenómeno y su duración. Para conocer el historial de eventos pasados se ofrece la prestación de la incorporación de una pantalla en el mismo dispositivo y de la habilitación de un puerto micro USB para comunicarse con una interfaz gráfica en la computadora.

La plataforma puede obtener la magnitud de los primeros 31 armónicos de la señal de entrada y presentarlos en forma gráfica o en un formato de tabla.

El equipo fue diseñado para medir los disturbios de la señal eléctrica con una frecuencia fundamental de 60 Hz, por lo que el resultado de los cálculos realizados por el sistema embebido aplicados a una entrada de diferentes características, devolvería datos incorrectos.

El equipo fue puesto a prueba mostrando resultados con una variación menor al 5%, comparado con instrumentos comerciales, aunque es importante mencionar que, al ser una plataforma de investigación y desarrollo, queda abierta la posibilidad de mejorar los algoritmos y la incorporación de nuevas capacidades.

En un principio se comenzó a programar una arquitectura basada en el microprocesador microblaze programándolo en lenguaje C pero, al necesitar de la creación de bloques con VHDL, se optó por dejar la arquitectura completa en lenguaje de descripción de hardware.

Con la realización de este proyecto de tesis se tuvo la oportunidad de adquirir nuevos conocimientos en dos áreas importantes para el desarrollo como profesional, la calidad de la energía, que es el tópico principal del proyecto y, por otro lado, los sistemas embebidos, que representa un tema de interés a lo largo de la carrera. Aprender acerca de nuevas tecnologías permite abrir un panorama en lo que se refiere a nuevos proyectos y futuras investigaciones.

El término de estos estudios de posgrado permite mejorar las capacidades y habilidades para ponerlas en práctica en mi trabajo actual, para continuar con mi plan de vida y comenzar con el trayecto hacia la realización de un doctorado.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ambardar, A. (2002). *Procesamiento de Señales Analógicas y Digitales*.
- ANALOG DEVICES. (2018). AD 7265. Differential/Single-Ended Input, Dual 1 MSPS, 12-Bit, 3-Channel SAR ADC. Norwood USA.
- Ángel Silva, M. Á., & Ordóñez Plata, G. (2005). Calidad de la Energía Eléctrica: Diseño y Construcción de un Prototipo como Alternativa para la Monitorización de Interrupciones y Caídas de Tensión. *Revista de la Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas*, 4(2), 75-84.
- Biletskiy, Y., Nanacekivell, S., Chang, L., & Riming, S. (2017). An FPGA-based Power Quality Monitoring and Event Identifier.
- Chattopadhyay, S., Mitra, M., & Sengupta, S. (2011). *Electric Power Quality*. New York: Springer.
- Díaz Rodríguez, J. L., Pabón Fernández, L. D., & Contreras Peña, J. L. (2015). Low-cost platform for the evaluation of single phase electromagnetic phenomena of power quality according to the IEEE 1159 standard. 119-129.
- Enrique Pinto, R. (2004). *Calidad de la Energía Eléctrica*. Universitas.
- IEEE Power & Energy Society. (2009). IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. New York: IEEE.
- INTESC electronics & embedded. (2019). [www.intesc.mx](http://www.intesc.mx). Recuperado el 7 de Junio de 2019, de <https://www.intesc.mx/productos/asserta/>
- Jiménez, R., & Cerro, J. (s.f.). Perspectiva de calidad de la energía eléctrica y su importancia en México. *Área de Normalización, Departamento de Compatibilidad Electromagnética*.
- Joao, L., Batista, A. J., & Sepúlveda, M. J. (2003). Low cost digital system for power quality monitoring. *Información Tecnológica*, 15-23.
- Kilter, J., Meyer, J., Howe, B., & Zavoda, F. (2012). Current practice and future challenges for power quality monitoring perspective Harmonics and Quality of Power (ICHQP).
- Oubrahim, Z. (2017). On Electric Grid Power Quality Monitoring using Parametric Signal Processing Techniques.

Pinzón, A. O., Useche, G., & Rodríguez, G. (2011). Diseño e implementación de un equipo analizador de calidad de energía eléctrica. *Revista colombiana de tecnologías de avanzada*.

Robledo Leal, G. M. (2008). Calidad de la Energía Eléctrica: Camino a la Normalización.

Tektronix. (s.f.). Series TBS1000B y TBS1000B-EDU Osciloscopios de almacenamiento digital - Manual del usuario. Obtenido de [www.tektronix.com](http://www.tektronix.com)

Teledyne Lecroy. (2013). WaveStation Function/Arbitrary Waveform Generator Operator's Manual.

V. Oppenheim, A., W. Schafer, R., & R. Buck, J. (s.f.). *Tratamiento de Señales en Tiempo Discreto*. Prentice Hall.

# ANEXOS

## Anexo A. Certificado de publicación de artículo



RENIECYT - LATINDEX - Research Gate - DULCINEA - CLASE - Sudoc - HISPANA - SHERPA  
UNIVERSIA - E-Revistas - Google Scholar - DOI - REDIB - Mendeley - DIALNET - ROAD - ORCID

CDMX, August 23 - 2019

**TURIJÁN-ALTAMIRANO, Salomón Noé**  
ORCID: 0000-0003-3790-7055, CVU CONACYT ID: 377682  
**MUÑOZ-HERNÁNDEZ, Germán Ardul**  
ORCID: 0000-0003-4861-0345, CVU CONACYT ID: 122490  
**CHÁVEZ-CANO, Omar**  
ORCID: 0000-0002-1883-1932, CVU CONACYT ID: 857314  
**RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, Julio**  
ORCID: 0000-0003-0515-778X, CVU CONACYT ID: 78003

Instituto Tecnológico de Puebla

### PRESENT:

We are pleased to inform you that your article “**Platform design for monitoring the quality of electrical energy**” with keywords “Power Quality, Embedded System, Harmonic Distorsión, Fast Fourier Transform”. Has been published on pages 1-9 in “**Journal of Computational Systems and ICTs**”, *V-5 N-15* with ISSN: **2444-5002**. Journal edited by ECORFAN-Mexico, S.C. Holding Spain. (2019).

This article is classified in:

Area: Engineering and technology  
Field: Technological sciences  
Discipline: Computer technology  
Subdiscipline: Automated quality control systems

This article is published in:  
[http://ecorfan.org/spain/researchjournals/Sistemas\\_Computacionales\\_y\\_TICs/vol5num15/Journal\\_of\\_Computational\\_Systems\\_and\\_ICTs\\_V5\\_N15\\_1.pdf](http://ecorfan.org/spain/researchjournals/Sistemas_Computacionales_y_TICs/vol5num15/Journal_of_Computational_Systems_and_ICTs_V5_N15_1.pdf)

The Journal is Arbitrated by peer review is Indexed and deposited in Databases:

LATINDEX (Scientific Journals of Latin America, Spain and Portugal)  
RESEARCH GATE (Germany)  
GOOGLE SCHOLAR (Citation indices-Google)  
REDIB (Ibero-American Network of Innovation and Scientific Knowledge- CSIC)  
MENDELEY (Bibliographic References Manager)

We issue this certificate for the purposes of science, technology and innovation

Regards.

PERALTA-CASTRO, Enrique. MSc.  
CIO-ECORFAN-México, S.C.  
CONACYT-RENIECYT: 1702902

ECORFAN-México, S.C.  
143 – 50 Izozop Street  
La Florida, Ecatepec Municipality  
Mexico State, 55120 Zipcode  
Phone: +52 | 55 6159 2296  
Skype: ecorfan-mexico.s.c.  
E-mail: [contacto@ecorfan.org](mailto:contacto@ecorfan.org)  
Facebook: ECORFAN-México S. C.  
Twitter: @EcorfanC

[www.ecorfan.org](http://www.ecorfan.org)

### Holdings

Mexico	Colombia	Guatemala
Bolivia	Cameroon	Democratic
Spain	El Salvador	Republic
Ecuador	Taiwan	of Congo
Peru	Nicaragua	Paraguay