



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias Instrumentación y control automático

TESIS

“Desarrollo e implementación de un analizador de calidad de energía con base en FPGA para motores trifásicos”

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en Ciencias en Instrumentación y control automático

Presenta:

Ing. Martín Jonathan Molano Clemente

Dirigido por:

Dr. Juvenal Rodríguez Reséndiz

SINODALES

Dr. Juvenal Rodríguez Reséndiz
Presidente

Dr. Gonzalo Macías Bobadilla
Secretario

Dr. Luis Miguel Contreras Medina
Vocal

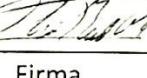
M.C. José Marcelino Gutiérrez Villalobos
Suplente

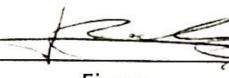
M.C. José Luis Avendaño Juárez
Suplente

Dr. Aurelio Domínguez González
Nombre y Firma
Director de la Facultad

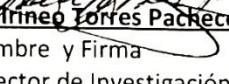

Firma


Firma


Firma


Firma


Firma

Firma

Firma
Dr. Irineo Torres Pacheco
Nombre y Firma
Director de Investigación
y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro
Diciembre de 2013
México

**“Desarrollo e implementación de un analizador de
calidad en energía con base en FPGA para motores de
tres fases”**

por “Ing. Martín Jonathan Molano Clemente”

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo es el desarrollo de un analizador de calidad basado en la tecnología FPGA para ayudar a la evaluación de la calidad de energía en sistemas trifásicos, ya que en los últimos años el crecimiento de las redes de distribución de energía, las cargas no lineales en el sistema y el uso de motores pueden provocar efectos a la red eléctrica, los cuales pueden tener un efecto muy significativo en el presupuesto a nivel industrial. Una deficiencia en la calidad de energía puede provocar costo de un mantenimiento frecuente, fallas en los equipos, paros de producción y multas por la compañía de suministro de energía. El desarrollo del presente trabajo muestra la metodología utilizada para el desarrollo del instrumento que incluye, el diseño de un circuito de acondicionamiento para las señales de alta corriente y voltaje que a su vez describe la etapa para aislar la parte de potencia con la electrónica. Así también se describe los protocolos de comunicación para los periféricos como el sistema de adquisición de datos, y el puerto para transmisión de datos. Una vez con los datos adquiridos por el sistema se procede a la implementación del diseño de hardware en el FPGA, el diseño describe el control principal para las diferentes tareas que realiza el analizador de calidad de energía, describe operaciones para el cálculo de índices de calidad de energía, con el resultado del diseño implementado observar las perturbaciones en la red examinando las variaciones en los índices de calidad de energía. El diseño de hardware es basado en las normas IEC 61000-4-30 y IEC 61000-4-7, los cuales describen los métodos de medición de calidad de energía de forma técnica y métodos para el cálculo de armónicos e interarmónicos y la instrumentación. El dispositivo realiza el cálculo de voltaje pico, voltaje RMS, corriente pico, corriente RMS, factor de cresta, cálculo de interarmónicos y THD para cada uno de los canales de medición. También realiza el cálculo de potencia activa y potencia aparente para cada par de medición de corriente y voltaje. Los resultados de los cálculos fueron comparados con respecto a señales simuladas y se observó un error menor de 1% para cada índice de calidad con respecto al cálculo en el software Matlab, pero presentó mayor error cuando se implementó con el circuito de acondicionamiento, ya que los traductores no lineales presentan un error en la medición y ruidos producidos por los elementos del circuito de acondicionamiento, es por esto que un análisis profundo en este sistema es adecuado. De manera general el dispositivo sigue los requerimientos de las normas y es una forma viable para la evaluación de la calidad de energía.

(Palabras clave: Calidad de la energía, alimentación trifásica, armónicos, FPGA).

SUMMARY

The main objective of this work is the development of a power quality analyzer based on FPGA technology to assist the evaluation of the quality of power in three-phase systems, since in recent years the growth of power distribution networks, the nonlinear loads in the system and the use of motors may cause electrical network effects, which can have a very significant effect on the industry-wide budget. A deficiency in power quality can cause frequent maintenance cost, equipment failures, production stoppages and fines for power supply company. The development of this work shows the methodology used for development of the instrument including the design of a circuit signal conditioning for high current and voltage which in turn describes the stage to isolate the power to the electronics. Well describes the communication protocols for peripherals such as the data acquisition system, and the port for data transmission. Once the data acquired by the system proceeds to the hardware implementation of the design in the FPGA, the design describes the primary control for the different tasks performed by the power quality analyzer, described operations to calculate quality indices energy , with the result of the design implemented disturbances observed in the network by examining the variations in power quality indices . The hardware design is based on IEC 61000-4-30 and IEC 61000-4-7, which describe the methods of measuring power quality technical manner and methods for the calculation of harmonics and interharmonics and instrumentation. The device performs the calculation of peak voltage, RMS voltage, peak current, RMS current, crest factor, and THD calculation interharmonics for each measurement channel. Also calculates active power and apparent power for each pair of current and voltage measurement. The results of the calculations were compared with respect to simulated signals and found an error less than 1 % for each quality index with respect to the calculation in Matlab software, but had higher error when implemented with conditioning circuit as nonlinear translators present a measurement error and noise produced by the conditioning circuit elements, which is why a thorough analysis in this system is adequate. Generally the device follows the requirements of the rules and is a viable way to assess the power quality.

(Key words: Power quality, three-phase power, harmonics,FPGA).

AGRADECIMIENTOS.

Quiero dedicar este trabajo a mis padres que me ha brindado su apoyo en todo momento, por los consejos brindados en toda esta etapa de la vida.

Agradezco a mis maestros por trasmisir los conocimientos que son fundamentales para culminar esta etapa.

Agradezco a mi asesor el Dr. Juvenal Rodríguez Reséndiz por su apoyo brindado, por su tiempo, por sus consejos y técnicas brindadas.

Agradezco a CONACYT por la beca y por el equipamiento proporcionado para la realización de este trabajo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	ii
SUMMARY	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	v
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
I INTRODUCCIÓN	1
I.1 Introducción	1
I.2 Descripción del problema.....	2
I.3 Antecedentes.....	3
I.3.1 Calidad de la energía	3
I.3.2 Instrumentos de medición y tecnologías	8
I.3.3 Normas	10
I.4 Justificación	12
I.5 Hipótesis y objetivos	13
I.5.1 Hipótesis general	13
I.5.2 Objetivo general	13
I.5.3 Objetivos específicos.....	13
II ESTADO DEL ARTE.....	14

II.1	La calidad de la energía	14
II.2	Índices de calidad de energía.....	16
II.2.1	Transitorios.....	19
II.2.2	Variaciones de corta duración de voltaje	19
II.2.3	Variaciones de larga duración de voltaje	22
II.2.4	Desequilibrio de voltaje	23
II.2.5	Distorsión de la forma de onda	23
II.2.6	Fluctuación de voltaje y fliker.....	26
II.2.7	Las variaciones de frecuencia	28
II.3	Normas para la medición de la calidad de energía	28
II.3.1	Norma IEC 61000-4-7.....	29
II.3.2	Norma IEC 61000-4-30.....	32
III	METODOLOGÍA	37
III.1	Desarrollo de sistema de acondicionamiento.....	37
III.1.1	Diseño.....	38
III.2	Diseño en FPGA	42
III.2.1	Protocolo de comunicación SPI.....	43
III.2.2	Control.....	45
III.2.3	Cálculos de índices de calidad.....	46
III.2.4	Comunicación UART para trasmisión serial.....	53
III.3	Desarrollo de aplicación PC para comparar datos	54

III.4	Instrumentación con dispositivo FPGA y FLUKE 435	56
IV	RESULTADOS	58
IV.1	Resultados de valor pico de voltaje	58
IV.2	Resultados de cálculo RMS de voltaje.....	60
IV.3	Resultados de valor pico de corriente	61
IV.4	Resultados de valor RMS de corriente.....	62
IV.5	Resultados de cálculo de potencia aparente.....	63
IV.6	Resumen de resultados.....	64
V	CONCLUSIONES Y PROSPECTIVAS	65
	BIBLIOGRAFÍA.....	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
II.1 Gráfica de la magnitud de duración para la clasificación de eventos de calidad de energía	17
II.2 Los fenómenos principales que causan perturbaciones electromagnéticas y en calidad de energía.....	18
II.3 Tabla de requisitos de exactitud.....	31
IV.1 Tabla de resultados y errores de medición	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
II.1. Interrupciones momentáneas debido a fallas.....	20
II.2. Swell instantáneo de voltaje causado por una falla en la línea-a-tierra.....	22
II.3. Las corrientes de un conmutador electrónico (gráfico superior) y de un controlador de velocidad ajustable para motor DC sin escobillas (gráfico inferior).	24
II.4. Medicion de forma de onda de corriente de una computadora personal.	25
II.5. Voltaje flicker causado por la operación del horno de arco.	27
II.6. Cadena de medición.	34
III.1. Diagrama de bloques de acondicionamiento para señal de voltaje.....	38
III.2. Circuito de acondicionamiento de señal de voltaje.....	39
III.3. Circuito de acondicionamiento de señal de corriente.	40
III.4. Circuito de acondicionamiento para voltaje y corriente implementado.....	41
III.5. Diseño general de sistema en FPGA.....	42
III.6. Comunicación con convertidor analógico-digital.	43
III.7. Protocolo SPI para comunicación con ADC.	44
III.8. Bloque de comunicación con el convertidor analógico-digital ADS8327.....	44
III.9. Diagrama de bloques de control.....	46
III.10. Diagrama de bloques de valor pico.....	48
III.11. Diagrama de bloques de valor RMS.	49
III.12. Diagrama de bloques FFT.....	50

III.13. Diagrama de bloques para THD.....	51
III.14. Diagrama de bloques para Factor de Potencia	52
III.15. Diagrama de bloques para transmisión serial.....	54
III.16. Aplicación para mostrar el cálculo.....	55
III.17. Diagrama de bloques de interfaz de usuario.	55
III.18. Instrumentación de motor trifásico.	56
III.19. Instrumentación de motor trifásico y Fluke 435.	57
IV.1. Gráfica de valor pico de voltaje.	59
IV.2. Gráfica de valor RMS de voltaje.	60
IV.3. Gráfica de datos de valor pico de corriente.....	61
IV.4. Gráfica de valor RMS de corriente..	62
IV.5. Gráfica de Potencia Aparente.	63

CAPÍTULO 1:

I INTRODUCCIÓN

I.1 Introducción

En la actualidad el tema de la calidad de energía es muy discutido en el campo de la ingeniería de sistemas eléctricos desde la llegada de los semiconductores de potencia y redes de transmisión. La industrialización y desarrollo de los países ha producido a nivel mundial un aumento considerable en el consumo de energía, es por eso que el monitoreo de la calidad de energía es una de las principales preocupaciones en la industria moderna con el fin de ahorrar gastos innecesarios, aumentar el ciclo de vida útil de los dispositivos eléctricos y cumplir con los estándares. La finalidad de un sistema de energía eléctrica es generar la energía y entregarla a equipos del usuario final con una tensión aceptable pero gracias a los contenidos armónicos de las cargas no lineales se generan problemas con la energía suministrada que deben ser monitoreados. Es por esto que el monitoreo continuo de la calidad de energía es relevante en la industria, ya que se ocupan equipos eléctricos costosos y se consumen grandes cantidades de energía.

Los sistemas de alimentación trifásica tienen muchas ventajas sobre los sistemas de una fase cuando se usa en aplicaciones industriales y comerciales, es por ello que son muy usados en la industria y es de gran interés el análisis y evaluación del desempeño del suministro de la red para estos sistemas. A pesar de importantes documentos, artículos y libros publicados en el área de calidad de la energía eléctrica, su definición no ha sido acordada universalmente. Sin embargo, la mayoría acepta que es un aspecto muy importante en los sistemas de energía y maquinaria eléctrica con impacto directo en la eficiencia, seguridad y fiabilidad (Fuchs Ewald, 2008).

En el presente trabajo muestra la propuesta de diseño de un sistema capaz de calcular en tiempo real los índices suficientes para una evaluación de la calidad de energía en sistemas con motores trifásicos y el monitoreo de los armónicos para cargas no lineales de manera confiable. El trabajo está contenido en cinco capítulos, el primer capítulo recopila la información de del problema, justificación y objetivos del trabajo.

En el capítulo dos se observa el estado del arte, del cual se tienen los elementos teóricos para realizar el proyecto.

El capítulo tres se tiene la metodología para resolver el problema.

El capítulo cuatro se exhibe los resultados del proyecto, lo que se obtuvo basado en los objetivos planteados y la metodología usada.

En el capítulo cinco se muestran las conclusiones del trabajo, las comparaciones las problemáticas del proyecto y así también las prospectivas del presente trabajo.

En este caso para poder hacer la medición de la calidad de energía se propone el uso de un circuito de acondicionamiento, un dispositivo FPGA (Field Programmable Gate Array) y un dispositivo ARM embebido, para respectivamente adquirir los datos las señales, el procesado de los datos y la presentación visual de la información.

I.2 Descripción del problema

Ahora en día tanto las empresas suministradoras de energía como los usuarios finales del servicio de energía eléctrica, han insistido cada vez más en el concepto de calidad de energía. Esto se inició en la década de los 80's y se ha convertido en un tipo de concepto general, alrededor del cual se puede ubicar una multitud de tipos de disturbios y problemas que se pueden presentar en un sistema eléctrico. En México, el suministro de energía eléctrica a los usuarios, está regido por la ley del servicio público y su reglamento, en donde especifican los límites

superior e inferior del voltaje de suministro en el punto de entrega al usuario. La entrega de voltajes fuera de estos límites se considera anomalía o deficiencia del suministro.

Así también última década se han introducido en gran medida equipos electrónicos a los sistemas de potencia. Debido a que estos equipos son susceptibles a pequeñas fluctuaciones en los parámetros de tensión, corriente y frecuencia, es de suma importancia el estudio de la calidad de energía. Además que una calidad eléctrica deficiente supone un costo adicional, debido a que el consumo excesivo, los factores de potencia bajos o los picos de consumo elevados podrían implicar sanciones por parte de la compañía eléctrica. Asimismo, también cabe considerar el costo añadido de los equipos empleados para subsanar los problemas, que se viene a sumar a los costos de mantenimiento y reparaciones.

En nuestros días la tecnología avanza por ello el aumento de los dispositivos eléctricos y el número de usuarios se han elevado considerablemente y cada vez es más necesario el monitoreo de la calidad de energía en sistemas de una o múltiples fases. En la industria el análisis de la calidad de energía no solo se ocupa para equipos alimentados con una fase, a nivel industrial los motores más usados son los de conexión trifásica, debido a sus numerosas ventajas respecto a los monofásicos.

Los aspectos de costos por la ineficiencia de la calidad de energía a nivel industrial pueden ser de gran impacto para la sustentabilidad de la empresa, es por esto que el análisis de la calidad de energía en redes trifásicas es de importancia, para monitorear la calidad en la red y eliminar los impactos que puede producir una mala calidad de energía.

I.3 Antecedentes

I.3.1 Calidad de la energía

Tanto las empresas suministradoras de energía como los usuarios finales del servicio de energía eléctrica, han insistido cada vez más en el concepto de calidad de energía. Se ha

convertido en un tipo de concepto general, al rededor del cual se puede ubicar una multitud de tipos de disturbios y problemas que se pueden presentar en un sistema eléctrico.

En nuestros días la tecnología avanza y el aumento de los dispositivos eléctricos y el número de usuarios se han elevado considerablemente y cada vez es más necesario el monitoreo de la calidad de energía. En relación a la calidad en energía se han desarrollado diferentes investigaciones en las cuales las tecnologías han ido cambiando y a la par los requerimientos. Algunos sistemas de monitoreo de la calidad de energía están basados en PC como muestra Aiello *et al.* (2004) que desarrolla un sistema de bajo costo basado en PC, para la medición de calidad de energía de acuerdo con el estándar IEC-6100-4-7 y IEC 61000-4-30. Es un sistema que mide armónicos e interarmónicos, disturbios en amplitud y disturbios de alimentación. El proyecto es desarrollado en el software LabView y un sistema de adquisición de datos comercial, el sistema verifica resultados con un dispositivo Fluke 6100A, para un sistema monofásico; así también Alves, R. *et al.* (2009) muestra el desarrollo del sistema de monitoreo que consiste en una tarjeta de acondicionamiento de señal y una computadora, además se le implementa un filtro activo de potencia, con él también puede calcular los valores de las corrientes y de potencia instantánea que la fuente tendría que suministrar si se utiliza un filtro de potencia activa para compensar los armónicos, calcula potencia reactiva y corriente de secuencia cero. El dispositivo presenta una alta gama de opciones debido a su desarrollo en el software LabView, registra los disturbios, analiza armónicos, funciona como osciloscopio y envía reportes a los e-mails de los usuarios. Otro dispositivo de Aiello *et al.* (2004) desarrolla un instrumento basado en PC desarrollado en LabView para medir armónicos e interatómicos de una fuente de energía, utiliza la transformada Chirp-Z (CZT) para aumentar la precisión en la medición de la frecuencia fundamental, con ello es posible obtener una mejor exactitud en la medición de la frecuencia fundamental, ya que con el cálculo de una FFT se obtiene una menor resolución, pero ocupa la FFT para obtener el cálculo de índices de energía de armónicos e interarmónicos con una exactitud de un dispositivo clase I cumpliendo los límites de error establecidos.

Otro tipo de tecnología basado en sistemas embebido se encuentran los procesadores digitales de señales (DSP) y existen trabajos como el de Olev Mirtens *et al.*(2007) que usando las herramientas de la programación orientada a objetos y el hardware del sistema embebido

configura un PLL por medio de software, para crear un reloj sincronizado con la frecuencia de la fuente de CA a la que es conectada. Guarda los índices de calidad de energía y contempla un error menor al 0.1% en las mediciones de voltaje, corriente, frecuencia y armónicos, además 0.2% para medición de potencia. Mohammed *et al.*(2006) presenta que debido a las limitaciones de la FFT (Transformada rápida de Fourier) en el análisis de las perturbaciones en calidad de energía, en su lugar se utiliza la transformada Wavelet continua (CWT) como un enfoque alternativo para el análisis estacionario, no estacionario y de señales no periódicas de banda ancha, debido a su capacidad de centrarse en intervalos cortos de tiempo para componentes de alta frecuencia, por otro lado la transformada Wavelet proporciona la ubicación precisa tiempo. Esta característica es apropiada para el análisis de las perturbaciones, tales como caída de tensión y transitorios en voltaje, los resultados de la investigación demuestran que la implementación en el DSP (procesador digital de señales) proporciona una detección rápida y precisa de las perturbaciones, además una mejora en el tiempo de procesamiento en comparación con una computadora pero su análisis no es cuantitativo ya que se enfoca solo en el corto tiempo de procesamiento y no en resultados comparables con un producto comercial o normalizado. Sobre la misma tecnología también está el trabajo de Cristina Gherasim *et al.*(2004) este trabajo describe el estándar IEEE Trial-Use Standard 1459 destinado a proporcionar definiciones para las potencias activa, reactiva y aparente, así como el factor de potencia. Este trabajo se centra en la aplicación de la norma IEEE y describe la metodología para su implementación en un DSP para una red trifásica. El software está desarrollado en lenguaje C y el código es generado por Matlab Real-Time. Realiza pruebas con cargas no lineales, pero no compara los resultados con otro equipo y no realiza alguna prueba para obtener el error, además no contempla todos los armónicos como la norma IEC. Krzysztof Górecki *et al.*(2007) presenta los problemas con la calidad de la energía encontrada en los casos de las redes eléctricas de baja tensión en un hospital, propone el desarrollo que utiliza los recursos del procesador de señales y realiza una sincronización digital con base en el cruce por cero para poder obtener los cálculos que necesiten ser cada medio periodo de la señal y también usar el cruce por cero para sincronizar el sistema de adquisición.

Los dispositivos FPGA han sido usados en los últimos tiempos en investigaciones actuales y se encuentran algunos trabajos relacionados con el monitoreo de la calidad de energía como por ejemplo, el artículo de Delle Antonio *et al.* (2009) es basado en diseño de un prototipo para la medición de la calidad de energía usando un controlador reconfigurable. El monitoreo y el diseño del hardware es desarrollado usando sistemas de National Instruments Real-Time, con el software de LabView implementado en un FPGA y sistema de adquisición de datos tomados de la misma empresa. El diseño obtiene diez índices de calidad de energía, entre ellos se encuentran: el cálculo de la desviación en frecuencia, fluctuaciones de la magnitud en la alimentación, flickers, amplificación y atenuación, transitorios, desequilibrios y además armónicos e interarmónicos de voltajes y corrientes. El desarrollo también propone un método para compensar el error del transductor usado para medir voltajes, por medio de una caracterización del sensor y el procesado de la señal. El sistema es una opción viable cuando se requiere un dispositivo de desarrollo rápido, pero es de un alto costo por los elementos que lo conforman.

Camilo Quintáns *et al.* (2006) realiza un dispositivo con comunicación USB para la computadora, utilizando una FPGA para la adquisición de datos, además se usa una tarjeta de expansión para acondicionamiento de señal. Se genera un programa en el software Matlab para la realización de la transformada rápida de Fourier y mediante una interfaz de usuario en el mismo software se muestra la información. Este trabajo es un ejemplo de solución rápida para el análisis de las señales y es un pequeño paso para el procesamiento de señales, el dispositivo no cuenta con procesamiento de datos en el sistema FPGA pero es un primer acercamiento para un analizador de calidad basado en FPGA. Otro trabajo importante es el de Ferrignol *et al.* (2008) que desarrolla un dispositivo para la evaluación de la calidad de energía basados en las normas IEC-61000-7 y IEC-61000-30, se basa en el desarrollo en un dispositivo FPGA y la implementación de un filtro para la estimación de armónicos e interarmónicos y cálculos de valor RMS. Propone el cálculo de la FFT usando ventanas de 200ms con un equivalente de 12 períodos fundamentales de 60hz y con una resolución de 5hz, así también calcula los valores del THD. El sistema de adquisición maneja una velocidad de 12.5 kHz por canal y los resultados experimentales arrojan que el dispositivo cumple con los requisitos de un dispositivo clase-I de la IEC aplicado para el cálculo de armónicos e interarmónicos. Este artículo cumple muy bien con las normas establecidas para el cálculo de interarmónicos, pero se ve restringido a estos,

dejando a un lado índices de calidad de energía importantes como los cálculos de potencia activa aparente o factor de potencia, así también solo ocupa la medición para sistemas monofásicos.

El sistema que propone Cardoso *et al.* (2008) es un sistema de monitoreo basado en FPGA para la observación específicamente de la frecuencia fundamental del sistema, propone un sensor inteligente para la estimación de la frecuencia con alta resolución en los sistemas eléctricos sobre la base de la implementación de hardware de la transformada Chirp Z en un dispositivo FPGA, que permite estimaciones reales de frecuencia. También presenta otro trabajo que es una solución accesible por la mayoría industrias para satisfacer continua y directa las necesidades de monitoreo. Dos casos de estudio se presentan para demostrar la implementación y rendimiento, el instrumento desarrollado se compara con un producto comercial con el fin de validar los resultados, los datos obtenidos son: valor RMS de tensión, corriente RMS, pico de voltaje, picos de corriente, factor cresta de voltaje, factor cresta de corriente, distorsión armónica total de la tensión RMS, distorsión armónica total de la corriente en su valor RMS, distorsión armónica total de la tensión en su componente fundamental, distorsión armónica total de la corriente en su componente fundamental, la tensión RMS de armónicos sin su componente fundamental, corriente RMS de armónicos sin su componente fundamental, la distorsión factor de potencia, potencia real, potencia aparente, potencia reactiva, potencia pico, distorsión de potencia, factor de potencia total y desplazamiento del factor de potencia para un sistema monofásico. El sistema no se basa en la metodología de las normas IEC es por ello que omite funciones como la frecuencia de muestreo y cálculo de armónicos mínimos.

También se encuentra un analizador de calidad para monitoreo de tres fases (Romero *et al.*, 2011). En su investigación desarrolla un analizador de calidad de energía para alimentación de tres fases usando un dispositivo FPGA de la familia Xilinx, crea una tarjeta de acondicionamiento de señal para poder medir corrientes y voltajes del sistema de alimentación. El sistema de adquisición se realiza con un convertidor analógico digital de 16 bits de cuatro canales con salida serial, con una frecuencia de adquisición de 2kHz.

Algunos de los índices de calidad que se realizan son: valores picos, valores RMS y valores de cresta para cada señal de corriente y de voltaje. Además utiliza la transformada de Fortescue para medición de desequilibrio en términos de porcentajes para cada una de las fases de la alimentación. Algunas mediciones estadísticas para representación de datos que muestran se en

el artículo son la media y la desviación estándar. Por lo que este trabajo a pesar del método implementado, es deficiente para un cálculo más exhaustivo del análisis de la calidad de energía en la red, dado a que no sigue las normas de la IEC y los datos calculados no son suficientes.

Los anteriores dispositivos son de alta calidad y de gran desempeño pero debido a su desarrollo de hardware ocupa un mayor de desarrollo, para esto en el presente trabajo se desarrolla en conjunto la PC y la FPGA para pruebas y además un dispositivo embebido ARM para la presentación de los datos principales, con el fin de poder darle cierta portabilidad al sistema.

I.3.2 Instrumentos de medición y tecnologías

En el ámbito de la investigación se han desarrollado prototipos para el análisis de la calidad de energía, básicamente existen tres tecnologías que ocupan la investigación para el mejoramiento del sistema como son: Análisis con computadora, usando un DSP o bien, usando un FPGA. Estas tres tecnologías cumplen diferentes necesidades para los usuarios; con el uso de computadora se tiene un producto de rápido desarrollo pero con limitantes en la portabilidad y limitado por la velocidad de procesamiento y los datos a procesar. La tecnología DSP es de gran utilidad ya que cumple con un desarrollo dedicado al procesamiento de señales, lamentablemente se pueden tener dispositivos de esta tecnología con alto costo que pueden limitar el desarrollo. El FPGA es una tecnología que está creciendo en los últimos años y también puede ser dedicado al procesamiento de señales, el costo es menor que la mayoría de DSP y gracias a su desarrollo de hardware es posible tener un diseño eficiente aprovechando el paralelismo de esta tecnología.

En el mercado se encuentran así también productos comerciales de diferentes compañías, estos equipos son regularmente muy costosos que pueden o no incluir todos los cálculos de índices de calidad, ya que algunos algoritmos se pueden obtener pagando un costo extra. Los equipos comerciales a diferencia de los desarrollados por investigadores, son sistemas cerrados que no pueden modificarse para desarrollar nuevos algoritmos y nuevas tendencias para el

análisis de calidad de energía, esto puede imposibilitar el desarrollo de nuevos instrumentos con mejores capacidades o bien con mejor análisis. Por otro lado estos sistemas comerciales pueden ser una base para comparar un sistema nuevo y comprobar los resultados. Algunos dispositivos comerciales son los siguientes:

Analizador de la energía y de la calidad eléctrica 435 Serie II Fluke.

El precio es de alrededor de \$105,000 pesos y algunas características de los cálculos son:

- **Vrms** con una exactitud de $\pm 0,1\%$ del voltaje nominal
- **Vpico** con una exactitud de 5% del voltaje nominal
- **Factor de cresta (CF) de voltaje** con una exactitud de $\pm 5\%$
- **Orden de armónicos (n)** : CC, agrupamiento de 1 a 50: Grupos de armónicos de acuerdo con la norma IEC 61000-4-7.
- THD (Dispersión armónica total) con una exactitud de $\pm 2,5\%$
- **Factor de potencia (Cos j/DPF)** con una exactitud de $\pm 0,1\%$ con condiciones de carga nominal

Registrador Trifásico Fluke 1735

El registrador Fluke 1735 es el medidor de potencia ideal para los electricistas o técnicos, ya que permite realizar estudios de la energía eléctrica y registros de datos básicos de la calidad eléctrica. Configure el registrador en segundos gracias a su pantalla en color y a sus sondas de corriente flexibles. Además, el analizador de calidad eléctrica es capaz de medir la inmensa mayoría de los parámetros de energía eléctrica y armónica, y de capturar eventos de tensión. Su precio es de aproximadamente \$45,000 pesos.

Las especificaciones en la exactitud son:

- **Medida de Vrms**

Error intrínseco: $\pm (0,2\% \text{ del valor medido} + 5 \text{ dígitos})$

Error de funcionamiento: $\pm (0,5\% \text{ del valor medido} + 10 \text{ dígitos})$

Resolución: 0,1 V

- **PF (Factor de potencia)**

Rango: De 0,000 a 1,000

Resolución: 0,001

Precisión	$\pm 1\%$ del valor máximo de la escala
• Vm, Im, THDV, THDI: IEC 61000-4-7:2002, Clase II	
$V_m \geq 3\% V_n$:	$\pm 5\% V_m$
$V_m < 3\% V_{nom}$:	$\pm 0,15\% V_{nom}$
$I_m \geq 10\% I_{nom}$:	$\pm 5\% I_m$
$I_m < 10\% I_{nom}$:	$\pm 0,5\% I_{nom}$
THDV:	para una distorsión armónica total (THD) $< 3\% \pm 0,15\%$ en V_{nom}
	para una THD $\geq 3\% \pm 5\%$ en V_{nom}
THDI:	para una THD $< 10\% \pm 0,5\%$ en I_{nom}
	para una THD $\geq 10\% \pm 5\%$ en I_{nom}
Tensión nominal:	Rango de tensión nominal
Corriente nominal:	Rango de corriente nominal. V_m e I_m son valores medidos de armónicos m.

I.3.3 Normas

La IEC 61000 (EN 61000), es una de las referencias más utilizadas para la calidad de energía en Europa, contiene seis partes, cada una con estándares y reportes técnicos:

Parte 1 (General). Dos secciones cubren la aplicación e interpretación de los aspectos de la EMC (compatibilidad electromagnética).

Parte 2 (Medio Ambiente). Doce secciones dan la clasificación del entorno electromagnético y los niveles de compatibilidad para diferentes entornos. Algunos aspectos de este documento se incluyen los niveles de armónicos de compatibilidad en sistemas de baja tensión residencial (IEC 61000-2-2), plantas industriales (IEC 61000-24) y sistemas de media tensión residencial (IEC 61000-2-12).

Parte 3 (Límites). Once secciones cubren límites de emisión de armónicos y otras perturbaciones. Algunos aspectos de este documento incluyen límites armónicos de corriente de emisión para los equipos conectados a baja tensión con baja (menos de 16 A por fase) corriente (IEC 61000-3-2), flicker (IEC 61000-3-3), límites de emisiones de corriente armónica para equipo conectado a baja tensión con elevada (superior a 16 A por fase) corriente (IEC 61000-3-4), y la evaluación de los límites de emisión para cargas distorsionantes en sistemas de energía de media tensión y alta tensión, (IEC 61000-3-6).

Parte 4 (Técnicas de ensayo y de medida). Treinta y un secciones se describen los métodos estándar para el equipo de prueba de la emisión y la inmunidad a distintas perturbaciones. Algunos aspectos de este documento incluyen mediciones de armónicos e interarmónicos, e instrumentación (IEC 61000-4-7), dips e interrupciones (EN 61000-4-11), interarmónicos (EN 61000-4-13), y los métodos de medición de calidad de energía (IEC 61000-4-30).

Parte 5 (Pautas para la instalación y mitigación). Siete secciones de puesta a tierra, el cableado, la mitigación y grados de protección contra perturbaciones electromagnéticas.

Parte 6 (Normas genéricas). Cinco secciones cubren las normas de inmunidad y emisiones para entornos residenciales, comerciales, industriales y entornos de las centrales eléctricas.

I.4 Justificación

Hoy en día , la calidad de la energía es un tema muy importante debido al impacto económico de sobre los usuarios industriales , sector que sufre pérdidas millonarias causadas por la mala calidad de la energía, según M.H.J. Bollen *et al.* (2003) la calidad de energía deficiente se caracteriza por la presencia de armónicos en el alimentación de línea por controladores de velocidad ajustables, producir un funcionamiento errático de los sistemas de protección, corrientes de neutro excesivas en sistemas trifásicos de cuatro cables , el recalentamiento de los motores , bancos de capacitores y cableado en general , disminuyendo considerablemente el ciclo de vida útil de los dispositivos eléctricos(Lara Cardoso *et al.*, 2008), costo que puede ocasionar reparaciones de equipos, mantenimientos frecuentes, sanciones por el suministro y paro de producción. Así también debido que las redes de suministro de energía son más profundas y extensas ocasionadas por el aumento continuo de usuarios o equipos con el servicio, su análisis se ha convertido en un factor indispensable para garantizar el buen funcionamiento de equipos y mantener una alta confiabilidad de los sistemas de potencia.

Por la relevancia que este tema tiene en el ámbito industrial existen una gran cantidad de instrumentos disponibles en el mercado para el estudio de calidad de la energía, en general estos equipos son muy costosos y pueden no permitir realizar una caracterización completa de los sistemas de energía o bien es necesario pagar un costo adicional. Algunos de los equipos comerciales no puede ser reconfigurado de acuerdo a características de la carga, los acuerdos específicos del proveedor al cliente y nuevos estándares. (Massimo *et al.* 2001).

Es por esto que el desarrollo de un dispositivo de menor costo puede ser auxiliar para empresas pequeñas a medianas que no puedan conseguir un equipo comercial para analizar la calidad de energía o bien para las grandes industrias que no pueden contar con muchos dispositivos para analizar la calidad de energía para hacer un análisis en distintas zonas de la red eléctrica. Además el problema de la deficiente calidad de energía y el desarrollo de nuevas tecnologías se han abierto para cubrir todas las necesidades de los usuarios en aplicaciones específicas de medición y es por esto que un equipo reconfigurable puede ser la solución.

I.5 Hipótesis y objetivos

I.5.1 Hipótesis general

Con base al artículo “Instrumento reconfigurable para monitoreo de calidad de energía en sistemas de tres fases” y las normas IEC 61000-4-7 e IEC 61000-4-30 es posible realizar de forma eficiente un análisis de la calidad de energía, con precisión de un analizador industrial, basado en la tecnología FPGA para motores trifásicos.

I.5.2 Objetivo general

El objetivo de esta tesis es diseñar e implementar en un dispositivo usando la tecnología FPGA los cálculos de índices de calidad de energía para evaluar la calidad de energía trifásica.

I.5.3 Objetivos específicos

1. Diseñar un dispositivo para monitoreo de la calidad de energía eléctrica, portable y de menor costo que los comerciales.
2. Implementar el cálculo de 5 índices de calidad de energía en el dispositivo FPGA para el monitoreo en motores trifásicos.
3. Realizar comunicación con la computadora y LCD para presentar la información.
4. Evaluar el desempeño del analizador de calidad, comparando las mediciones con un dispositivo comercial.

CAPÍTULO 2:

II ESTADO DEL ARTE

II.1 La calidad de la energía

Según explica Bollen *et al.* (2003), existe mucha confusión sobre el significado del término "calidad de la energía", en inglés americano el término de energía es usado como "potencia" y se utiliza como sinónimo de "electricidad", además, es el transporte de energía por unidad de tiempo. Diferentes autores utilizan definiciones diferentes. Un conjunto coherente de definiciones se da de la siguiente manera:

Calidad de voltaje se ocupa de las desviaciones de la tensión desde su forma ideal. El ideal de voltaje es una onda sinusoidal de única frecuencia de constante amplitud y frecuencia.

La calidad de corriente es el término complementario a calidad de voltaje: se ocupa de la desviación de la corriente desde su forma ideal. La corriente ideal es de nuevo una onda sinusoidal de frecuencia única de constante amplitud y frecuencia, con el requisito adicional de que la onda sinusoidal de corriente está en fase con la onda sinusoidal de tensión.

Calidad de la energía:

Es la combinación de la calidad de la tensión y la calidad de corriente

Calidad del suministro:

Es una combinación de calidad del voltaje y los aspectos no técnicos de la interacción de la red eléctrica con sus clientes.

Calidad del consumo:

Es el término complementario a la calidad del suministro.

Tenga en cuenta que no todos estos términos son igualmente comúnmente utilizados, especialmente la calidad de corriente y la calidad de consumo se utilizan con más frecuencia. También tenga en cuenta que otras fuentes dan otras definiciones a menudo contradictorias. Todas las definiciones dadas anteriormente se aplican a la interfaz entre la red (empresa) y el cliente. Esto puede ser por ejemplo un cliente nacional y la red de distribución de baja tensión pública, una planta individual y la red de distribución de media tensión industrial, una central eléctrica y una red de transporte o una red de transporte y una red de distribución. El término calidad de la energía es, sin duda no se limita a la interacción entre la red eléctrica y el equipo del usuario final.

Perturbaciones en la calidad de alimentación (es decir, desviaciones de voltaje y / o corriente desde el ideal) vienen en dos tipos, basados en la forma en que una característica de voltaje o de corriente y mide:

Las variaciones son pequeñas desviaciones de las características de voltaje o corriente de su valor nominal o ideal, por ejemplo, la variación de la tensión RMS y la frecuencia de sus valores nominales, o la distorsión armónica de voltaje y corriente. Las variaciones son alteraciones que se miden en cualquier momento en el tiempo. La distorsión armónica, se presenta como un ejemplo de una variación de calidad de la energía.

Los eventos son desviaciones mayores que sólo se producen de vez en cuando, por ejemplo, interrupciones de voltaje o corriente de conmutación de carga. Los eventos son trastornos que comienzan y terminan con un cruce de umbral.

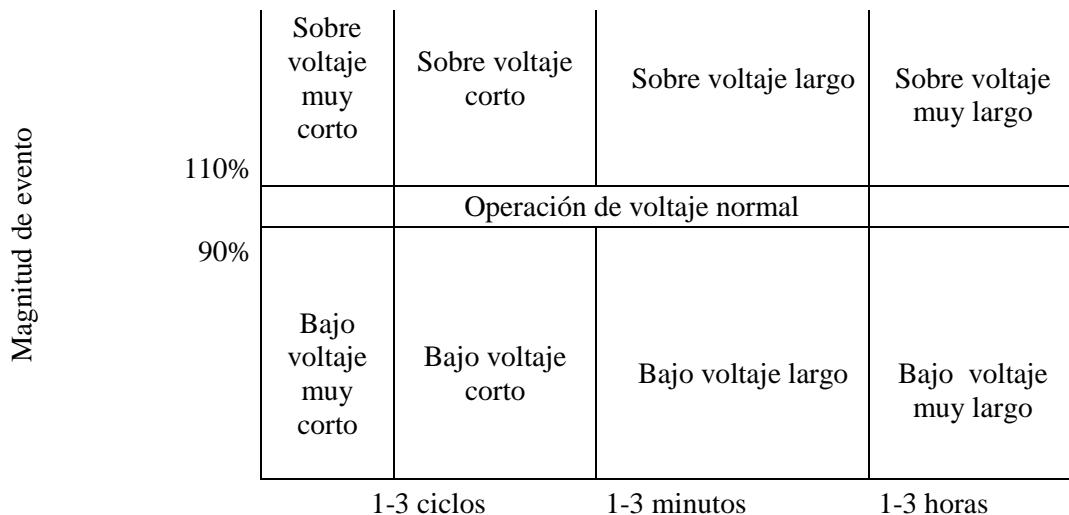
La diferencia entre las variaciones y eventos no siempre es evidente, y en relación con la forma en que se mide la perturbación. La mejor manera de distinguir entre los dos es de la siguiente manera: las variaciones se pueden medir en cualquier momento en el tiempo; los eventos requieren la espera de una característica de voltaje o corriente que excedan de un umbral predefinido. A medida que la fijación de un umbral es siempre algo arbitrario no hay frontera clara entre las variaciones y eventos. Aun así la distinción entre ellos sigue siendo útil y se hace (implícitamente de forma explícita) en casi cualquier estudio de calidad de la energía. Sin embargo, tenga en cuenta que aquí también que no hay coherencia en la terminología. Por ejemplo, las mediciones del voltaje RMS puede ser la base para una variación (cuando se

registran continuamente promedios 10-min), sino también para un evento (inicial y final cuando los huecos de voltaje RMS por debajo de 90% de la tensión nominal).

II.2 Índices de calidad de energía

La calidad de la energía es un término que se refiere a una amplia variedad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan al voltaje y la corriente en un momento dado y en un lugar determinado en el sistema de energía. La creciente aplicación de equipos electrónicos que pueden causar perturbaciones electromagnéticas, o que pueden ser sensibles a estos fenómenos, ha aumentado el interés por la calidad de la energía en los últimos años . Acompañando el incremento de los problemas de operación han sido una serie de intentos de describir los fenómenos. Desafortunadamente, los diferentes segmentos de la comunidad electrónica han utilizado distintos términos para describir los eventos electromagnéticos.

La norma IEC clasifica los fenómenos electromagnéticos en varios grupos, como se muestra en la Tabla II.2. La norma IEC aborda los parámetros eléctricos realizados se muestran en Tabla II.2. Las condiciones de alta y baja frecuencia no están definidas en términos de un determinado rango de frecuencias, sino que están destinadas a indicar la diferencia relativa en el contenido de la frecuencia principal de los fenómenos enumerados en esta categoría.

Tabla II.1 Gráfica de la magnitud de duración para la clasificación de eventos de calidad de energía.

Esta práctica recomendada contiene algunos términos adicionales relacionados con la terminología IEC. El término sag en la calidad de la energía se utiliza comúnmente como un sinónimo para el término “dip” de la IEC. La categoría de las variaciones de corta duración se utiliza para referirse a los huecos de tensión e interrupciones breves. El término “swell” se presenta como una inversa del sag (dip). La variación de larga duración categoría ha sido añadida a tratar límites con la norma ANSI C84.1-1989. El ruido categoría se ha añadido para hacer frente a fenómenos realizados de banda ancha. La categoría de distorsión de forma de onda se utiliza como una categoría contenedor para los armónicos IEC, interarmónicos, y de corriente continua en corriente alterna redes así como un fenómeno adicional de IEEE Std 519-1992 llamado muescas.

Existen diferentes clasificaciones para los problemas de calidad de energía, cada uno con una característica específica de clasificar el problema. Algunos de ellos se clasifican los acontecimientos como fenómenos "estado no estacionario" y "estado estacionario". En algunas regulaciones (por ejemplo, ANSI C84.1), el factor más importante es la duración del evento. Otras directrices (por ejemplo, IEEE-519) utilizan la forma de onda (duración y magnitud) de

cada evento para clasificar los problemas de calidad de energía. Otras normas (por ejemplo, IEC) utilizan la gama de frecuencias de la prueba para la clasificación.

En la Tabla II.2 se muestran los fenómenos principales que causan perturbaciones electromagnéticas y en calidad de energía de acuerdo con la clasificación de IEC.

Tabla II.2 Los fenómenos principales que causan perturbaciones electromagnéticas y en calidad de energía.

Fenómenos de baja frecuencia conducidas

Fenómenos de baja frecuencia	Armónicos, interarmónicos Señalización de voltaje Las fluctuaciones de voltaje Dips de voltaje Desequilibrio de voltaje Variaciones de frecuencia de energía Voltajes de baja frecuencia inducidas Componentes de corriente continua en redes de CA
Fenómenos de alta frecuencia conducidas	Los campos magnéticos Los campos eléctricos
Fenómenos de alta frecuencia	Tensiones inducidas de onda continua o corrientes Transitorios unidireccionales Transitorios oscilatorios
Fenómenos de descarga electrostática	Los campos magnéticos Los campos eléctricos Campo electromagnético Ondas en estado estacionario Transitorios
Pulso electromagnético nuclear	

II.2.1 Transitorios

Transitorios del sistema eléctrico son eventos indeseables, rápido y de corta duración que producen distorsiones. Sus características y formas de onda dependen del mecanismo de generación y parámetros de la red "Surge" a menudo se considera sinónimo de transitorios.

Los transitorios se pueden clasificar con sus muchos componentes característicos tales como amplitud, duración, tiempo de subida, frecuencia de sonar la polaridad, la capacidad de entrega de la energía, la densidad espectral de amplitud, y frecuencia de aparición. Los transitorios son generalmente clasificados en dos categorías: impulsivos y oscilatorios (Tabla II.1).

Un transitorio impulsivo es un cambio repentino en la frecuencia de la condición de estado estacionario del voltaje, corriente, o ambos que es unidireccional en polaridad. La causa más común de transitorios impulsivos es un impulso de corriente eléctrica. Los transitorios impulsivos pueden excitar la frecuencia natural del sistema.

Un transitorio oscilatorio es un cambio repentino en la frecuencia de la condición de estado estacionario del voltaje, corriente, o ambos, que incluye los valores de polaridad positiva y negativa. Transitorios oscilatorios se producen por diferentes motivos en los sistemas eléctricos como aparatos de conmutación, conmutación de bancos de condensadores, dispositivos de protección contra sobre corriente y ferrorresonancia.

II.2.2 Variaciones de corta duración de voltaje

Esta categoría comprende la categoría de IEC "dips de voltaje" y "breves interrupciones". Según la clasificación de IEEE-1159, hay tres tipos diferentes de eventos de corta duración: instantáneos, momentánea y temporal. Cada categoría se divide en interrupción, sag, y swell. Principales casos de variaciones de voltaje de corta duración son las condiciones de falla, amplio gran carga de energización y conexiones perdidas.

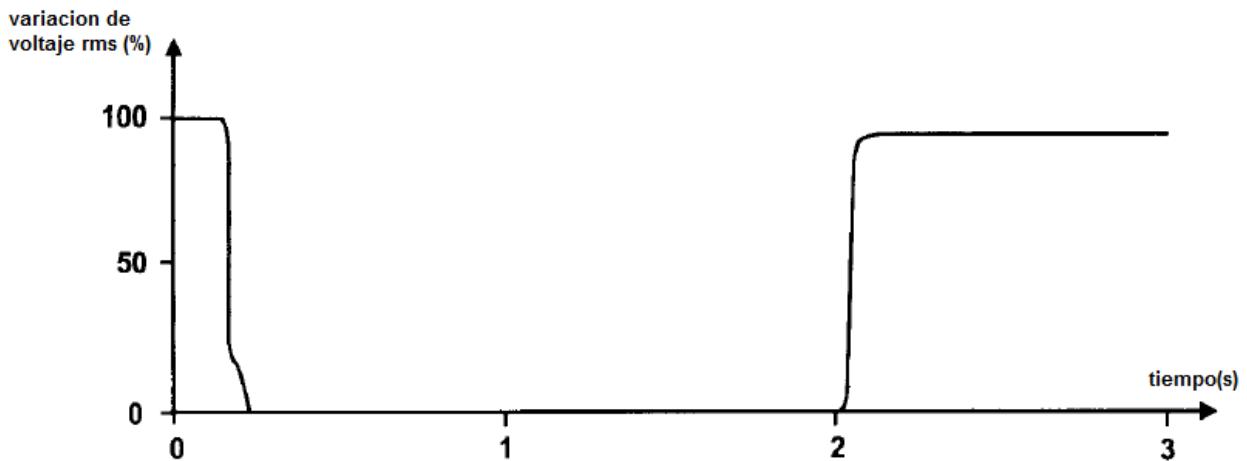


Figura II.1. Interrupciones momentáneas debido a fallas.

Interrupción. La interrupción se produce cuando el voltaje de alimentación (o corriente de carga) disminuye a menos de 0,1 pu (porcentaje unitario) durante menos de 1 minuto, como se muestra en la Figura II.1. Algunas causas de interrupción son fallas en los equipos, mal funcionamiento de control, y el fusible fundido o apertura del interruptor. La diferencia entre la interrupción y la interrupción de largo (o sostenida) es que en el primero, el suministro se restablece manualmente, pero durante la última el suministro se restablece automáticamente. La interrupción se mide por su duración. Por ejemplo, de acuerdo con la norma europea EN-50160:

- Una breve interrupción es de hasta 3 minutos.
- Una interrupción larga es más de 3 minutos.

Sin embargo, basado en el estándar IEEE-1250:

- Una interrupción instantánea es entre 0,5 y 30 ciclos.
- Una interrupción momentánea es de 30 ciclos y 2 segundos.
- Una interrupción temporal es de entre 2 segundos y 2 minutos.
- Una interrupción sostenida es de más de 2 minutos.

Sags (DIP). Caídas de voltaje son reducciones de corta duración en el voltaje RMS entre 0,1 y 0,9 del pu (porcentaje unitario). No existe una definición clara de la duración de la compresión, pero es por lo general entre 0,5 ciclos y un minuto. Los Sags de voltaje son causados generalmente por

- Excitación de cargas pesadas (por ejemplo, hornos de arco),
- Inicio de grandes motores de inducción,
- Faltas individuales de línea a tierra,
- Transferir la carga de una fuente de energía a otra.

Swells. El aumento de la magnitud de la tensión entre 1,1 y 1,8 del pu (porcentaje unitario) se llama swell, como se muestra (Figura II.2). La duración más aceptada de un oleaje es de 0,5 ciclos de 1 minuto a según Fuchs *et al.* (2005). Swells no son tan comunes como los sags y sus principales causas son:

- Desconexión de una carga grande
- Energizar un banco de capacitores
- Aumento de tensión de las fases sin falla durante una sola falla en la línea-a-tierra

En algunos libros de texto, el término "sobretensión momentánea" se utiliza como sinónimo de la expresión Swells. Al igual que en el caso de los sags, los UPS o acondicionadores de potencia son las típicas soluciones para limitar el efecto de swell (Sankaran *et al.*, 2002).

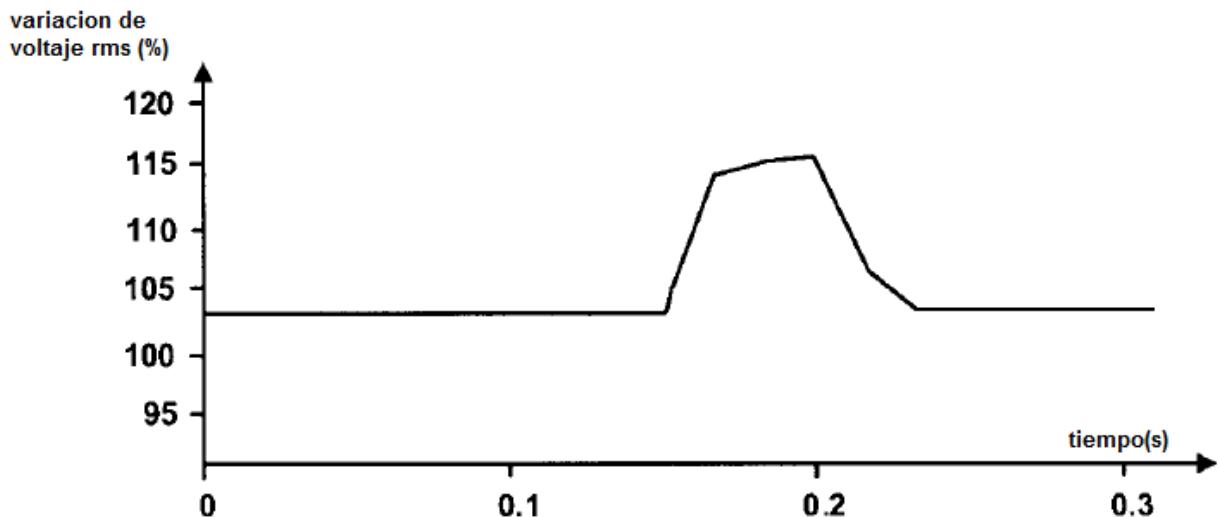


Figura II.2. Swell instantáneo de voltaje causado por una falla en la línea-a-tierra.

II.2.3 Variaciones de larga duración de voltaje

De acuerdo a las normas (IEEE-1159, ANSIC84.1), la desviación del valor eficaz del voltaje con respecto al valor nominal de más de 1 minuto se denomina variación de voltaje de larga duración. Las principales causas de las variaciones de voltaje de larga duración son las variaciones de carga y las operaciones de conmutación del sistema. IEEE-1159 divide a estos eventos en tres categorías (Tabla 1.2): interrupción sostenida, bajo voltaje y sobre tensiones.

Interrupción sostenida. La Interrupción sostenida es el más grave y el evento de calidad de la energía más antigua a la que voltaje cae a cero y no vuelve automáticamente. De acuerdo con la definición de la norma IEC, la duración de la interrupción sostenida es más de 3 minutos, pero sobre la base de la definición IEEE la duración es de más de 1 minuto. El número y la duración de las interrupciones largas son características muy importantes en la medición de la capacidad de un sistema de potencia para ofrecer un servicio a los clientes. Las causas más importantes de las interrupciones constantes son:

- Aparición del error en una parte de los sistemas de energía sin redundancia o con la parte redundante fuera de servicio.
- Una intervención incorrecta de un relé de protección que lleva a un corte de componente.

- Interrupción programada (o planificada) en una red de bajo voltaje sin redundancia.

Baja tensión. La condición de bajo voltaje se produce cuando el voltaje RMS disminuye a 0,8-0,9 del pu para más de 1 minuto.

Sobretensión. Sobretensión se define como un aumento en el voltaje RMS a 1,1 a 1,2 del pu para más de 1 minuto.

II.2.4 Desequilibrio de voltaje

Cuando los voltajes de un sistema trifásico no son idénticas en magnitud y / o las diferencias de fase entre ellos no son exactamente 120 grados, se produce el desequilibrio de voltaje. Hay dos maneras de calcular el grado de desequilibrio:

- Dividir la desviación máxima del promedio de los voltajes trifásicos por el promedio de los voltajes trifásicos.
- Calcular la relación del componente negativo (o componente cero) de secuencia a el componente de secuencia positiva.

II.2.5 Distorsión de la forma de onda

Una desviación de estado estable a partir de una onda sinusoidal de frecuencia de la red se denomina distorsión de forma de onda. Hay cinco tipos principales de distorsiones de forma de onda: DC offset, armónicos, interarmónicos, notching, y el ruido eléctrico. Una serie de Fourier se utiliza por lo general para analizar la forma de onda sinusoidal.

Offset DC. La presencia de una componente de corriente DC y / o voltaje en un sistema de CA se denomina offset DC. Las principales causas de offset DC en sistemas de potencia son

- Empleo de los rectificadores y otros dispositivos de conmutación electrónicos.

-Disturbios geomagnéticos.

Los armónicos. Los armónicos son voltajes o corrientes senoidales con frecuencias que son múltiplos enteros del sistema de potencia (fundamental) frecuencia (por lo general, F - 50 o 60 Hz). Formas de onda periódicas no sinusoidal pueden ser sometidas a series de Fourier y se pueden descomponer en la suma del componente fundamental y armónicos. Las principales fuentes de armónicos en sistemas de energía son:

- Cargas no lineales industriales, tales como equipos de electrónica de potencia, por ejemplo, *drivers* (Figura II.3), rectificadores, inversores, o cargas que generan los arcos eléctricos, por ejemplo, hornos de arco, soldadura máquinas, y la iluminación.
- Cargas residenciales con alimentación de modo conmutado como televisores, computadoras (Figura II.4), y las lámparas fluorescentes y de ahorro de energía.

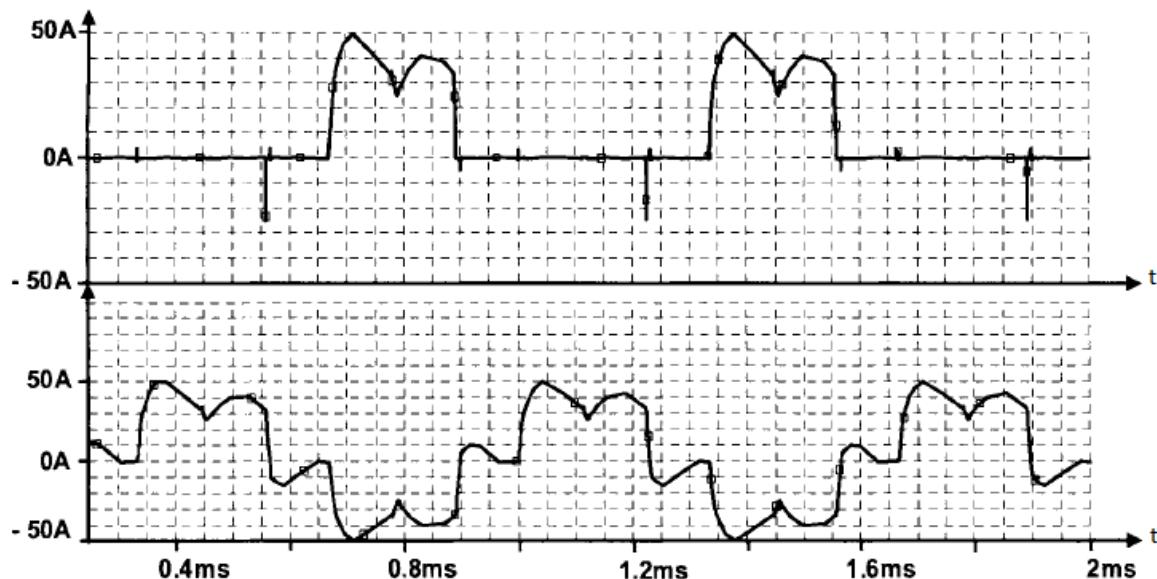


Figura II.3. Las corrientes de un conmutador electrónico (gráfico superior) y de un controlador de velocidad ajustable para motor DC sin escobillas (gráfico inferior).

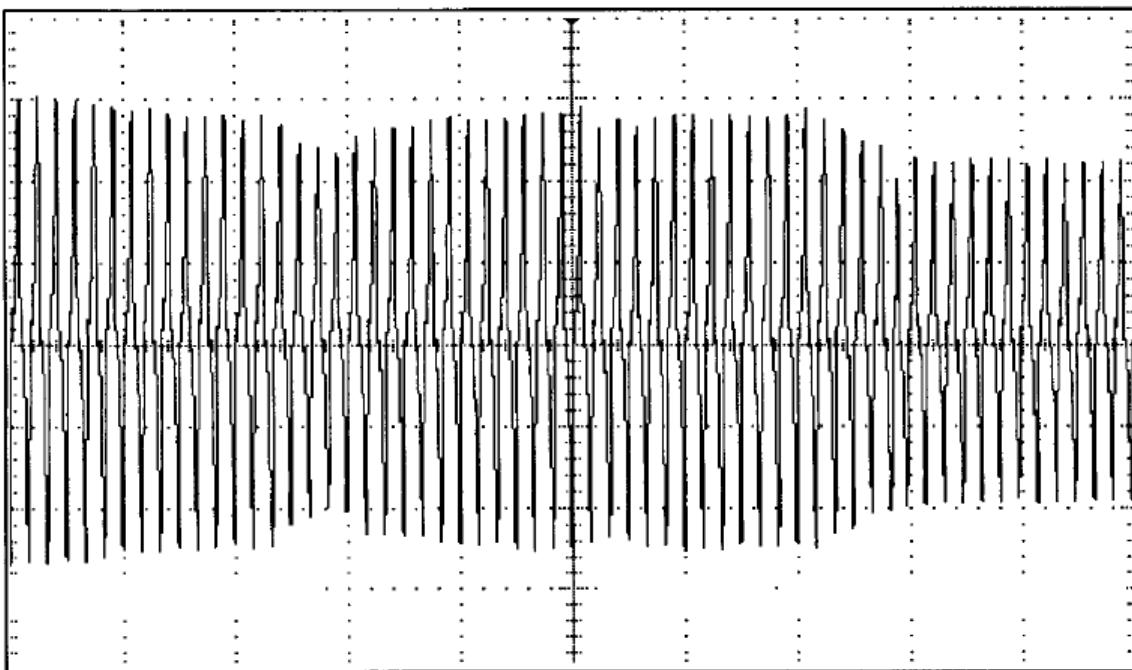


Figura II.4. Medicion de forma de onda de corriente de una computadora personal.

Algunos de los efectos perjudiciales de los armónicos son:

- Mal funcionamiento de los dispositivos de control.
- Pérdidas adicionales en los condensadores, transformadores y máquinas rotativas.
- Ruido adicional de los motores y otros aparatos.
- Interferencia telefónica
- Causa frecuencias de resonancia en serie y en paralelo (debido al condensador de corrección del factor de potencia y la capacitancia del cable), lo que resulta en la amplificación de voltaje incluso en una ubicación remota de la carga causante de distorsión.

Interarmónicos. Las frecuencias son múltiplos no enteros de la frecuencia fundamental.

Notching: Un disturbio periódico de voltaje causado por circuitos triristor en línea conmutado es llamado notching. El notching aparece en la línea de la forma de onda de voltaje durante una operación normal de energía a dispositivos electrónicos cuando la corriente comuta de una fase a otra. Durante los períodos de los notching, existe un corto circuito momentáneo entre dos fases conmutadas, reduciendo el voltaje de línea; la reducción de voltaje es limitada solo por la impedancia del sistema.

Los notching son repetitivos y pueden ser caracterizados en un espectro de frecuencias con un espectro alto. Los notching pueden imponer un estrés extra en los transformadores, generadores y equipos de medición sensibles.

Ruido eléctrico. El ruido eléctrico se define como señales eléctricas no deseadas con contenido espectral de banda ancha inferior a 200 kHz superpuesta al voltaje del sistema de alimentación o corriente en los conductores de fase, o que se encuentran en conductores neutrales o de señales. Ruido eléctrico puede ser consecuencia de conexiones defectuosas en los sistemas de transporte o distribución, hornos de arco, hornos eléctricos, dispositivos de electrónica de potencia, circuitos de control, equipos de soldadura, cargas con rectificadores de estado sólido, tierra inadecuada, apagando bancos de condensadores, variadores de velocidad, corona y circuitos de banda ancha de línea eléctrica de comunicación. El problema puede ser mitigado mediante el uso de filtros, acondicionadores de línea, y líneas dedicadas o transformadores. El ruido eléctrico afecta a los dispositivos electrónicos, como los microordenadores y controladores programables.

II.2.6 Fluctuación de voltaje y flicker

Las fluctuaciones de voltaje son variaciones sistémicas de la fuente de voltaje o cambios de voltaje al azar, la magnitud de la que normalmente no excede los rangos de voltaje especificados (por ejemplo, 0,9 a 1,1 pu definida por ANSI C84.1-1982)

Las fluctuaciones de voltaje se dividen en dos categorías:

- Cambios de paso voltaje, regular o irregular en el tiempo.
- Cambios de voltaje cíclicos o aleatorios producidos por las variaciones en el impedancias de carga.

Las fluctuaciones de voltaje degradan el rendimiento del equipo y causan la inestabilidad de los voltajes y corrientes de equipos electrónicos internos. Sin embargo, las fluctuaciones de voltaje en menos de 10% no afectan a los equipos electrónicos. Las principales causas de la fluctuación del voltaje son pulsos de potencia, soldadores de resistencia, la puesta en marcha de las unidades, hornos de arco y las unidades con cargas que cambian rápidamente.

Flicker. El flicker (Figura II.5) se ha descrito como "variaciones continuas y rápidas en el intensidad de la corriente de carga que provoca las variaciones de voltaje." El término flicker se deriva de los efectos de la fluctuación de la tensión en las lámparas de tal manera que se perciben a parpadear por el ojo humano. Esto puede ser causado por un horno de arco, una de las causas más comunes de las fluctuaciones del voltaje en los sistemas de distribución y transmisión.

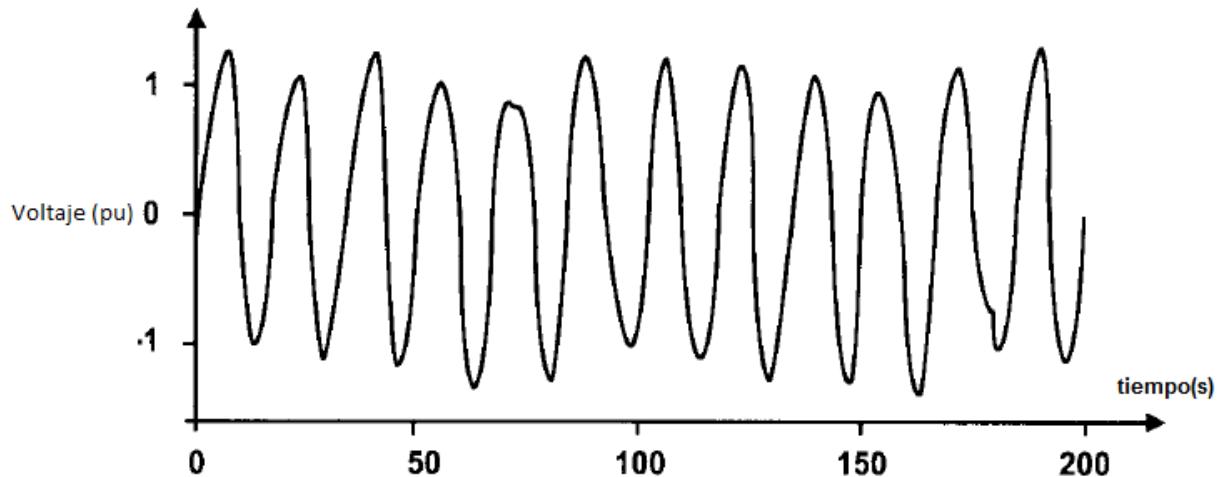


Figura II.5. Voltaje flicker causado por la operación del horno de arco.

II.2.7 Las variaciones de frecuencia

La desviación de la frecuencia fundamental del sistema de alimentación de su valor nominal especificado (por ejemplo, 50 o 60 Hz) se define como la variación de la frecuencia de alimentación. Si no se mantiene el equilibrio entre la generación y la demanda (carga), la frecuencia del sistema de potencia se desvía debido a los cambios en la velocidad de rotación de los generadores electromecánicos. La cantidad de desviación y su duración de la frecuencia depende de las características de la carga y la respuesta del sistema de control de generación a los cambios de carga. Fallas del sistema de transmisión de energía también pueden causar variaciones de frecuencia fuera del intervalo aceptado para el funcionamiento normal de estado estable del sistema de potencia.

II.3 Normas para la medición de la calidad de energía

Los sistemas de medición industriales cumplen ampliamente con diferentes tipos de normativas, los efectos de seguir una norma es el tener resultados comparables y reproducibles. Se ha mencionado las diferentes normativas para el estudio de la calidad de energía que dan diferentes tipos de respuestas al tema, pero en la implementación de un dispositivo para la medición de la calidad de energía o monitorear la red de un sistema existen normativas para el correcto cálculo y procesamiento de datos. Dentro de las normas para el fin de calcular los índices de calidad de energía se encuentra la IEC 61000-4-7 y la norma IEC 61000-4-30, la primera se caracteriza por proporcionar una metodología para la medición de armónicos e interarmónicos de la señal de voltaje o de corriente asimismo la norma IEC 61000-4-30 da observaciones de la forma de sincronizar los datos y los cálculos además de mostrar los rangos de medición de un dispositivo.

II.3.1 Norma IEC 61000-4-7

Esta parte de IEC 61000 es aplicable a los instrumentos destinados a medir los componentes espectrales en el rango de frecuencia hasta 9 kHz, que se superpone a la fundamental de los sistemas de suministro de energía a 50 Hz y 60 Hz. Por motivos prácticos, esta norma distingue entre armónicos, interarmónicos y otros componentes por encima de la gama de frecuencias armónicas, hasta 9 kHz.

Esta norma define la instrumentación de medida destinada a comprobar los elementos individuales de equipo de acuerdo con los límites de emisión que aparecen en ciertas normas (por ejemplo, límites de armónicos de corriente como dado en la norma IEC 61000-3-2), así como para la medición de corrientes y armónicos de voltaje en los sistemas de suministro actuales. La instrumentación para la medición por encima del rango de frecuencia armónica, hasta 9 kHz está tentativamente definida.

Algunas notas de la norma:

El documento trata en detalle con instrumentos basados en la transformada de Fourier discreta.

La descripción de las funciones y la estructura de los aparatos de medición de esta norma son muy explícitas y pretenda una interpretación literal. Esto es debido a la necesidad de disponer de instrumentos de referencia con resultados reproducibles, independientemente de las características de las señales de entrada.

El instrumento se define para dar cabida a las mediciones de hasta el rango de armónico 50.

Clases de precisión de la instrumentación

Se consideran dos clases de precisión (I y II), para permitir el uso de instrumentos simples y de bajo costo, de acuerdo con los requisitos de la aplicación. Para las pruebas de emisiones, la clase alta que se requiere si las emisiones están cerca de los valores límite.

Circuito de entrada de corriente

La norma indica que el circuito de entrada debe ser adecuado para las corrientes que se deben analizar. Se deberá proporcionar una medición directa de las corrientes armónicas y, además, debe tener una alta impedancia de entrada de bajo voltaje que puede estar asociado con derivaciones resistivas externas (o una combinación de los transformadores de corriente con derivaciones resistivas). La sensibilidad de entrada adecuada del circuito van desde 0,1 V a 10 V, con 0,1 V es el valor preferido.

La absorción de potencia del circuito de entrada de corriente no deberá exceder 3 VA para la instrumentación de clase II. Para que la instrumentación de clase I, el RMS entrada de la caída de voltaje no excederá de 0,15 V.

El instrumento debe ser capaz de aceptar señales de entrada con un factor de cresta hasta 4 para los rangos de hasta 5A RMS, 3,5 para 10A RMS y 2,5 para rangos más altos.

Circuito de entrada de voltaje

El circuito de entrada del instrumento de medida deberá ser adecuado para el voltaje máximo y la frecuencia de el voltaje de alimentación a ser analizado y mantendrá sus características y precisión sin cambios hasta 1,2 veces la voltaje máximo. Un factor de cresta de al menos 1,5 es suficiente para las mediciones, con excepción de los voltajes altamente distorsionados en las redes industriales, para los que puede ser necesario un factor de cresta de al menos 2.

Existen muchos voltajes nominales entre 60 V y 690 V, dependiendo de los usos locales. Para permitir un uso relativamente universal del instrumento para la mayoría de los sistemas de suministro, puede ser conveniente que el circuito de entrada que ser diseñado para las siguientes tensiones nominales:

Unom: 66 V, 115 V, 230 V, 400 V, 690 V para sistemas de 50 Hz

Unom: 69 V, 120 V, 240 V, 277 V, 347 V, 480 V, 600 V para sistemas de 60 Hz.

La absorción de potencia del circuito de entrada no superará 0,5 VA a 230 V. Si se proporcionan entradas de alta sensibilidad (menos de 50 V), la resistencia de entrada debe ser de al menos 10 k Ω / V.

Se debe tener cuidado de que el valor alto del voltaje fundamental (frecuencia de alimentación) en comparación con los otros componentes de voltaje a medir no produce sobrecarga causando daños o señales de intermodulación en las etapas de entrada del instrumento. Los errores causados estarán por debajo de la precisión indicada. Se instalará un indicador de sobrecarga.

Los requisitos de exactitud

Dos clases de precisión se sugieren para la instrumentación de medición de los componentes armónicos. Los errores máximos permitidos en la Tabla II.3 se refieren a las señales de frecuencia única y de estado estacionario, en el rango de frecuencia de operación, aplicados al instrumento, en condiciones nominales de funcionamiento que se indica por el fabricante (rango de temperatura, rango de humedad, voltaje de alimentación del instrumento, etc).

Tabla II.3 Tabla de requisitos de exactitud.

Clase	Medición	Condiciones	Error máximo
I	Voltaje	Um \geq 1% Unom Um < 1% Unom	$\pm 5\%$ Um $\pm 0,05\%$ Unom
	Corriente	Im \geq 3% Inom Im < 3% Inom	$\pm 5\%$ Im $\pm 0,15\%$ Inom
	Potencia	Pm \geq 150 W Pm < 150 W	$\pm 1\%$ Pnom $\pm 1,5$ W
II	Voltaje	Um \geq 3% Unom Um < 3% Unom	$\pm 5\%$ Um $\pm 0,15\%$ Unom
	Corriente	Im \geq 10 % Inom Im < 10 % Inom	$\pm 5\%$ Im $\pm 0,5\%$ Inom
Inom: Margen nominal de corriente del instrumento de medición Unom: Rango de tensión nominal del instrumento de medición Um y Im: Los valores medidos			

Algunas notas que ayudan a indicar las características de las clases son las siguientes:

NOTA 1 Los instrumentos clase I constituyen recomendaciones que son necesarias medidas precisas, como para verificar el cumplimiento de las normas, la resolución de conflictos, etc

Cualquiera de los dos instrumentos que cumplan con los requisitos de la Clase I, cuando se conecta a las mismas señales, producir resultados que coincidan dentro del precisión especificada (o indicar una condición de sobrecarga).

NOTA 2 Se recomiendan instrumentos de clase II para mediciones de emisiones, La clase II se recomienda para estudios generales, pero también se puede utilizar para las mediciones de emisiones si los valores son tales que, incluso teniendo en cuenta el aumento de la incertidumbre, es claro que no se superen los límites . En la práctica, esto significa que los valores medidos deben ser inferiores a 90% de los límites permitidos.

NOTA 3 Además, los instrumentos de la clase I, el desfase entre canales individuales debe ser menor que $n \times 1^\circ$.

Las frecuencias fuera del rango de medición del instrumento serán atenuados con el fin de no afectar a los resultados. Para obtener la atenuación adecuada, el instrumento puede muestrear la señal de entrada a una frecuencia mucho más alta que el rango de medición. Por ejemplo, la señal analizada puede tener componentes superiores a 25 kHz, pero se tienen en cuenta únicamente los componentes de hasta 2 kHz. Un filtro de paso bajo de anti-aliasing, con una frecuencia de 3 dB por encima del rango de medición deberá ser proporcionada. La atenuación en la banda de detención excederá de 50 dB. NOTA Por ejemplo, un filtro Butterworth de orden quinto consigue 50 dB de atenuación en aproximadamente tres veces la frecuencia de -3 dB.

II.3.2 Norma IEC 61000-4-30

Esta parte de la norma IEC 61000-4 define los métodos para la medición y la interpretación de los resultados para los parámetros de calidad de la energía en 50/60 Hz en sistemas de suministro de energía de corriente alterna.

Los métodos de medición se describen para cada parámetro relevante en términos que dan resultados fiables y repetibles, independientemente de la ejecución del método. Esta norma

proporciona los métodos de medición y los requisitos de rendimiento adecuados, pero no establece umbrales.

Los efectos de transductores insertados entre el sistema de potencia y el instrumento son reconocidos, pero no se abordan en detalle en esta norma.

Clases de métodos de medición

Para cada parámetro medido, se definen tres clases (A, S y B). Para cada clase, se incluyen los métodos de medición y los requisitos de rendimiento adecuados.

- Clase A

Esta clase se utiliza cuando se requieren medidas precisas, por ejemplo, para aplicaciones contractuales que pueden requerir la resolución de conflictos, verificación del cumplimiento de las normas, etc. Cualquier medida de un parámetro llevado a cabo con dos instrumentos diferentes que cumplen con los requisitos de la Clase A, en la medición de las mismas señales, producirán resultados coincidentes dentro de la incertidumbre especificada para ese parámetro.

- Clase S

Esta clase se utiliza para aplicaciones estadísticas como las encuestas o de evaluación de calidad de energía, posiblemente con un subconjunto limitado de parámetros. Aunque utiliza intervalos equivalentes de medición como de clase A, los requisitos de procesamiento de la clase S son más bajos.

- Clase B

Esta clase se define con el fin de evitar hacer muchos diseños actuales instrumentos obsoletos.

Organización de las mediciones

La magnitud eléctrica a medir puede ser directamente accesible, como es generalmente el caso de los sistemas de bajo voltaje, o accesibles a través de transductores.

Un instrumento puede incluir toda la cadena de medición como en la Figura II.6. En esta norma, la parte normativa no tiene en cuenta los transductores de medición externos al instrumento y su incertidumbre asociada.

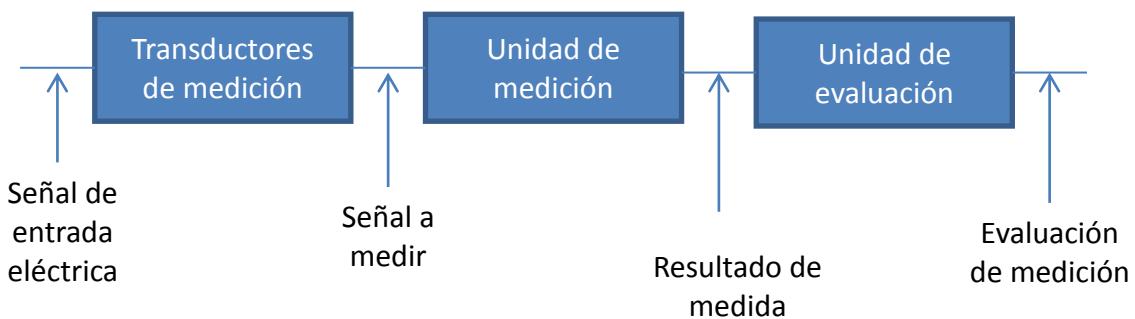


Figura II.6. Cadena de medición.

Valores eléctricos a medir

Las mediciones se pueden realizar en los sistemas de suministro monofásico o polifásico. Dependiendo del contexto, puede ser necesario medir tensiones entre conductores de fase y neutro (línea a neutro) o entre los conductores de fase (línea a línea) o entre los conductores de fase o neutro y tierra (fase-a-tierra, neutro a tierra). No es el propósito de esta norma imponer la elección de los valores eléctricos que deben medirse. Por otra parte, a excepción de la medición del voltaje de desequilibrio, que es intrínsecamente polifásico, los métodos de medición especificadas en esta norma son tales que los resultados independientes se pueden producir en cada canal de medición. Valores instantáneos de fase a fase.

Agregación de medición en intervalos de tiempo

Clase A

El intervalo de tiempo de medición básico para magnitudes de parámetros (voltaje de alimentación, los armónicos, interarmónicos y desequilibrio) deberá ser un intervalo de tiempo de ciclo de 10 para un sistema de energía de 50 Hz o intervalo de tiempo de 12 ciclos para un sistema de energía de 60 Hz.

La medición 10/12-ciclos se volverá a sincronizar en cada RTC 10 min

. NOTA 1 La incertidumbre de esta medida se incluye en el protocolo de medición de la incertidumbre de cada parámetro.

Los valores 10/12-ciclos se agregan más de 3 intervalos adicionales:

- Intervalo 150/180-ciclos (150 ciclos para 50 Hz nominal o 180 ciclos para 60 Hz nominal).
- Intervalo de 10 min.
- Intervalo de 2 horas.

- Clase B

El fabricante deberá especificar el número y la duración de los intervalos de tiempo de agregación.

Parámetros de calidad de energía- Magnitud del el voltaje de alimentación-Método de medición

Clase A

La medida de valor RMS de la magnitud del voltaje será durante un intervalo de tiempo de 10 ciclos para sistemas de energía de 50 Hz o 12 del ciclo de intervalo de tiempo para 60 Hz. Cada intervalo de 10/12-ciclos deberá ser contiguo, y que no se traslapen con intervalos 10/12-ciclos adyacentes.

- Clase S Igual que la clase A.
- Clase B La medida del valor RMS del voltaje será durante un período especificado por el fabricante.

Parámetros de calidad de energía- Armónicos de voltaje-Método de medición

- Clase A

La medida básica de armónicos de tensión, para la clase A, se define en la norma IEC 61000-4-7 clase I. Esta norma deberá ser utilizada para determinar una medida en subgrupos de armónicos en 10/12-ciclos.

Las mediciones se efectuarán por lo menos hasta el armónico 50. Si se calcula la distorsión armónica total, entonces se calculará como la distorsión armónica total de subgrupo (THDS), definido en la norma IEC 61000-4-7.

- Clase S

La medida básica de armónicos de tensión, para la clase A, se define en la norma IEC 61000-4-7 clase II. Esta norma deberá ser utilizada para determinar una medida en subgrupos de armónicos en 10/12-ciclos.

Las mediciones se efectuarán por lo menos hasta el armónico 40 (EN 50160).

- Clase B

El fabricante deberá especificar el método de medición.

CAPÍTULO 3:

III METODOLOGÍA

III.1 Desarrollo de sistema de acondicionamiento

En un sistema de adquisición para el monitoreo de calidad de energía se manejan voltajes de alta amplitud, estas tensiones deben ser atenuadas para ser manipulables en posteriores procesos de acondicionamiento en el que se ocupan circuitos electrónicos, para ello se utilizan resistencias en modo de divisor de voltaje para reducir la señal a un valor considerable y manejable. Por otra parte debido a que las resistencias presentan una alta impedancia para posteriores procesos, se procede a usar un amplificador de isolación, con ello aseguramos una baja impedancia de salida y que el voltaje del divisor de tensión se mantiene en el valor original. Este amplificador también funciona como un aislador y separa el circuito en dos partes, el circuito de potencia para atenuar la señal y el circuito electrónico. El amplificador de isolación mantiene buena estabilidad, linealidad, ancho de banda de la señal.

Así también es necesario eliminar la oscilación de valores negativos de la señal, para ello usamos un amplificador operacional de precisión y resistencias con el fin de agregar un offset a la señal y así mantener una tensión oscilante únicamente positiva.

El siguiente paso posterior al offset de la señal, se propone un filtro antialiasing para un sistema de adquisición de datos, este filtro antialiasing es indispensable para limitar la banda de frecuencias que se podrá muestrear, además de eliminar ruido para su posterior muestreo por el convertidor analógico digital.

III.1.1 Diseño

En el bloque del divisor de voltaje se utilizan dos resistencias en serie de precisión, una de 470kOhms a 1W 1% y una resistencia de 3.9 kOhms a 1/4W 1%, estas resistencias son atenuadores para un voltaje máximo de 300V, a la salida del divisor tenemos una voltaje de salida máximo de $\pm 2.469V$, el cual se obtiene por la ecuación 1 donde R1 tiene un valor 470 kOhms y R2 tiene un valor de 3.9 kOhms.

$$V_{salida} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{entrada} \quad (1)$$

Debido a que estas resistencias son considerablemente altas, en la salida del divisor de tensión se propone un amplificador en modo seguidor, para eliminar la alta impedancia de las resistencias. Para el offset se propone un amplificador en modo sumador usando el amplificador OPA827 y una referencia REF5025 que nos ayuda a obtener un voltaje de 2.5 volts, con lo que nuestra salida posterior al sumador será de entre 0.03V a 4.46V, y así utilizar solamente una alimentación positiva.

El amplificador de isolación propuesto es el ISO124 con 0.01% de no linealidad máxima y un ancho de banda de hasta 50 kHz, y usa alimentación bipolar ya que este está antes de la etapa donde se aplica un offset en la señal.

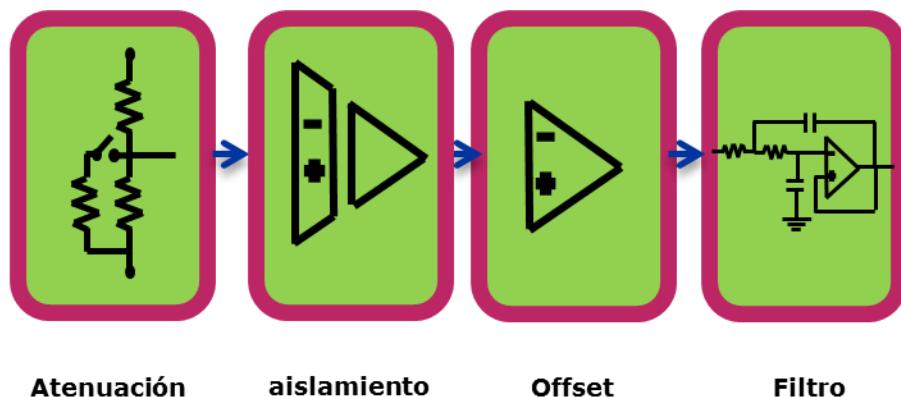


Figura III.1. Diagrama de bloques de acondicionamiento para señal de voltaje.

En la Figura III.1 se observa el diagrama de bloques del sistema de acondicionamiento de voltaje, con el cual se desarrolla el trabajo. Posterior al sistema de separación galvánica se propone un filtro antialiasing, este es un filtro activo, de tipo pasa-bajas, Butterworth en configuración Sallen Key, de segundo orden y se propone con una frecuencia de corte de 4.5kHz. Los valores de los componentes para este circuito son capacitores de 10nf y 20nf además de resistencias de 2.2kΩ.

En la Figura III.2 se muestra le circuito de acondicionamiento de voltaje, el elemento U1 es el sistema de aislamiento del circuito usando un iso124(Texas instruments), el cual necesita dos fuentes duales independientes para realizar una separación de tierra en ambos circuitos. Posteriormente el amplificador operacional U2 (OPA827) de la Figura III.2 agrega un offset de 2.5v con ayuda de un integrado de referencia REF5025(Texas instruments). El elemento U3 es un amplificador configurado como un filtro de segundo orden usando los capacitores y resistencias. Una vez con la señal acondicionada a medir, se propone un convertidor analógico-digital ADS8327(U4) que se alimenta con una referencia de 5v (REF5050), el convertidor cuenta con una resolución de 16 bits, cuenta con una frecuencia de adquisición máxima de 500kHz y usa un protocolo SPI para la comunicación y obtener la muestras.

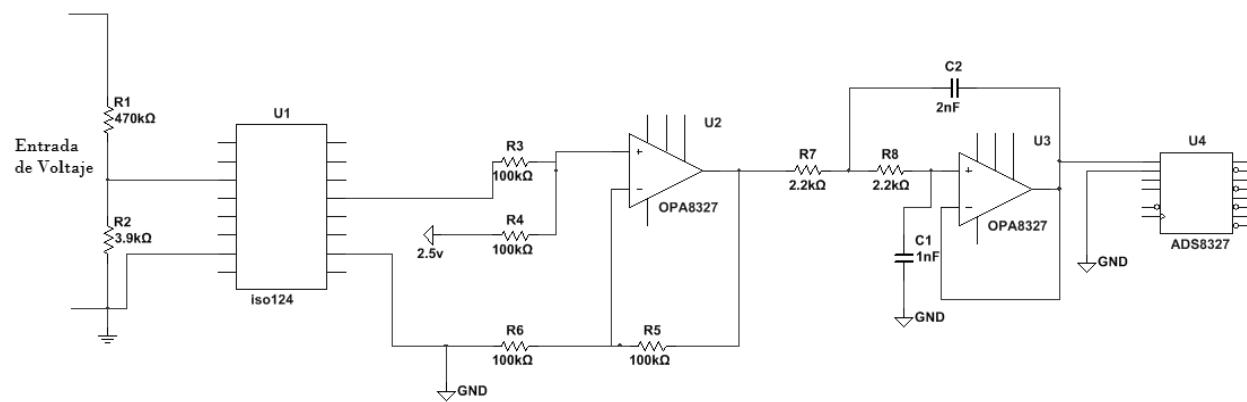


Figura III.2. Circuito de acondicionamiento de señal de voltaje.

Por otra parte, la adquisición de la señal de corriente es descrita por el diagrama de bloque de la Figura III.3, este diseño usa un sensor de corriente ACS712 el cual ofrece soluciones económicas y precisas para detección de corrientes en CA o CC en sistemas de comunicación y el paquete del dispositivo permite una fácil aplicación.

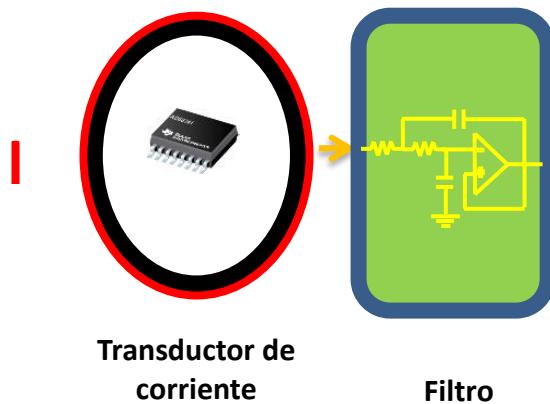


Figura III.3. Circuito de acondicionamiento de señal de corriente.

El dispositivo consiste en un circuito preciso, de bajo offset, lineal de efecto Hall. La resistencia interna del transductor es de $1.2\text{m}\Omega$ para una perdida muy pequeña de potencia y puede resistir condiciones de hasta cinco veces las condiciones de corriente. Además permite utilizar el transductor en aplicaciones que requieren aislamiento eléctrico sin el uso de otras técnicas de aislamiento costosas aisladores ópticos.

La corriente máxima que puede medir es de 30A pico con un ancho de banda de 80kHz y una sensibilidad de 66 mV/A, el sensor de corriente nos da una salida de 0-5v con un offset de la mitad de la alimentación, lo cual ayuda a la adquisición de datos.. En el diagrama de bloques (Figura III.3) se observa el filtro analógico, así como en la señal de voltaje se aplica un filtro activo antialiasing, pasa-bajas, Butterworth en configuración Sallen Key, de segundo orden y con una frecuencia de corte de 4.5kHz.

El diseño del circuito se implementó en un protoboard el cual se describe en la Figura III.4

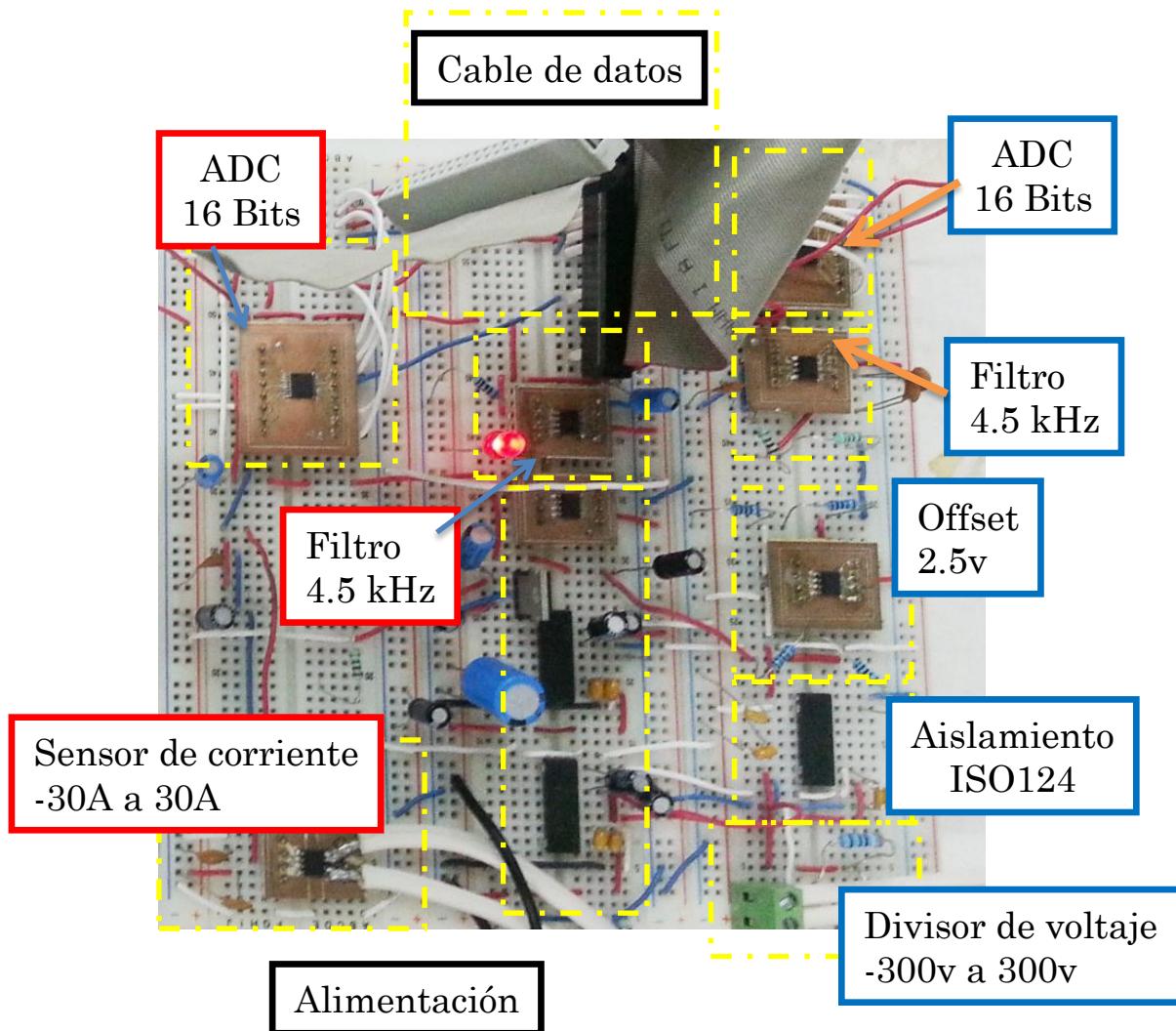


Figura III.4. Circuito de acondicionamiento para voltaje y corriente implementado.

El circuito muestra en la parte izquierda es para la medición de corriente y la parte derecha es para la medición de la tensión. Al final del circuito se encuentra el cable conector para la tarjeta FPGA. La fuente de alimentación se usa mediante baterías de 12v que alimenta un DCP020512 para alimentar con dos fuentes duales al sistema.

III.2 Diseño en FPGA

El diseño en el FPGA se basa en el diagrama de la Figura III.5, el cual toma en cuenta los periféricos de la tarjeta y el sistema de adquisición de datos. En la Figura III.5 se muestra el diagrama de bloques del diseño de hardware.

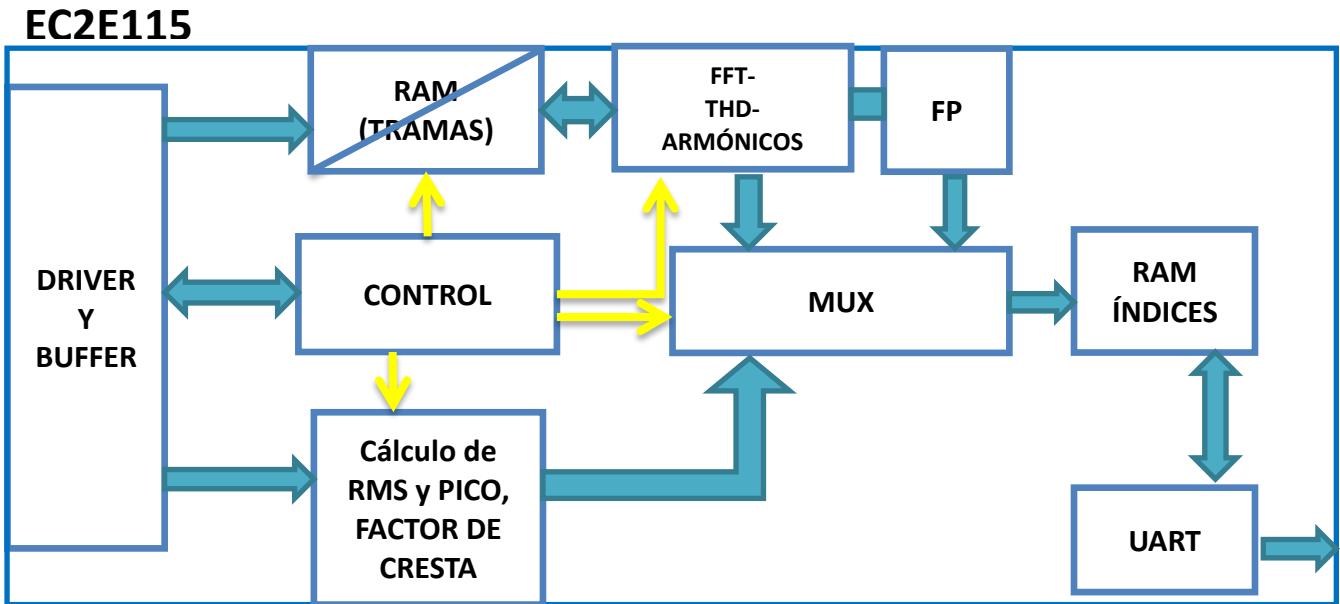


Figura III.5. Diseño general de sistema en FPGA.

El sistema para la implementación en el FPGA cuenta con cuatro elementos principales. El primer elemento es la etapa de adquisición de datos, para ello se desarrolla un controlador para la comunicación con los convertidores analógico –digital, otra etapa muy importante del sistema es el desarrollo del control, el control establece los tiempos y cuando realizar las acciones para el funcionamiento del proyecto, posteriormente se implementan los cálculos de los índices de calidad y el almacenamiento de los datos para realizar los cálculos, por último se realiza la etapa de envío de los datos obtenidos, se realiza un protocolo de comunicación para el envío correcto de los datos por medio del puerto serial con el protocolo UART.

III.2.1 Protocolo de comunicación SPI

El protocolo de comunicación para los convertidores analógico-digital (ADC) son de forma paralela, es decir el mismo protocolo es enviado al mismo tiempo a todos los convertidores analógico-digital, y al mismo tiempo se reciben todos los canales, tanto de corriente como de voltaje. La comunicación SPI se muestra en la Figura III.6 de la hoja de datos de ADS8327.

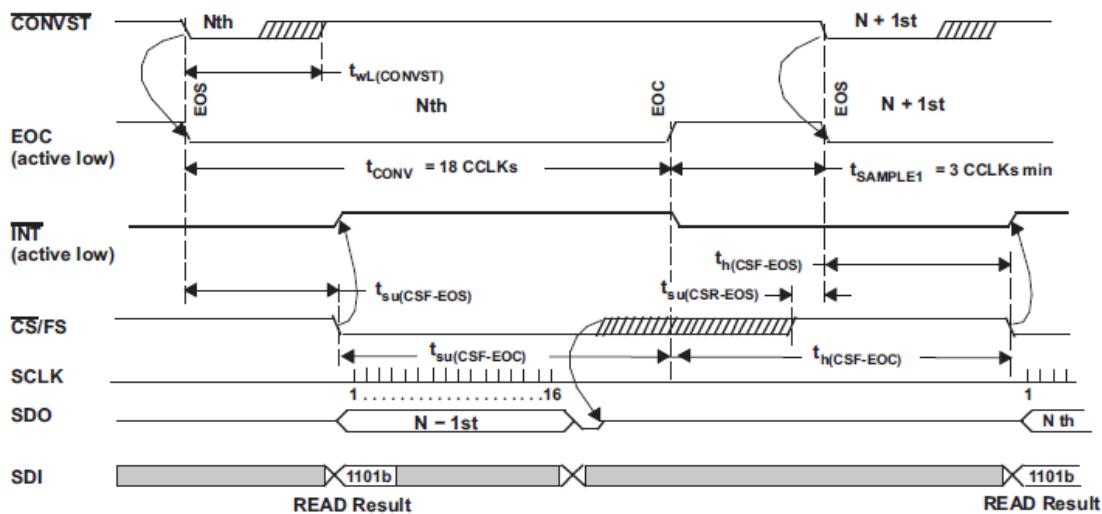


Figura III.6. Comunicación con convertidor analógico-digital.

El protocolo consiste en primero enviar un pulso al puerto CONVEST, para iniciar la comunicación, posteriormente el puerto de EOC del ADC se pone en bajo indicando que está en proceso de conversión, posteriormente se debe esperar por lo menos 40ns para poner en bajo el puerto CS/FS y enviar los pulsos. Los pulsos son enviados junto con la configuración para la conversión al ADC en el puerto SDI, posteriormente se espera cierto tiempo para que en cada pulso de reloj enviado se obtengan los datos de los 16 bits de la conversión a digital.

El diseño en VHDL se puede observar en la Figura III.7.

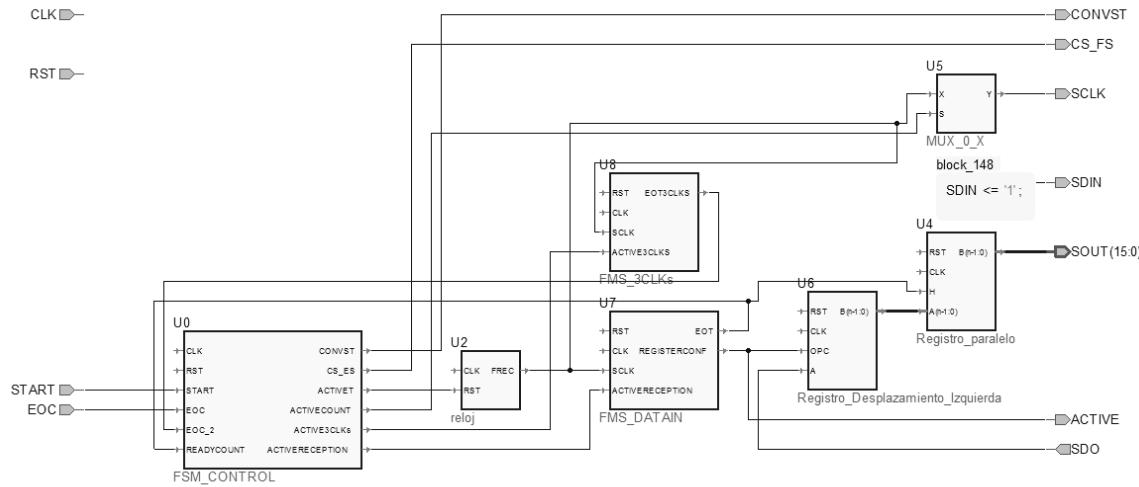


Figura III.7. Protocolo SPI para comunicación con ADC.

El diseño de la Figura III.7 consiste en el inicio de la adquisición controlado por FSM_CONTROL que es una máquina de estados que controla todo el sistema, se crea un reloj (U2) para los pulsos de transmisión y recepción de datos, una máquina de estados de espera de tres ciclos de reloj (U8), y al final una máquina de estados (U7) para guardar los datos que se van obteniendo bit por bit, con ayuda de un registro de desplazamiento a la izquierda vamos introduciendo bit por bit en la memoria del registro(U6). Al final se obtiene un bloque importante del diseño (Figura III.8).

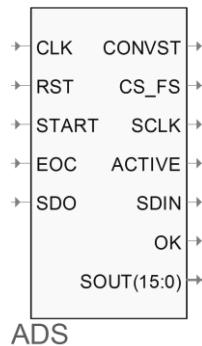


Figura III.8. Bloque de comunicación con el convertidor analógico-digital ADS8327.

Posteriormente la etapa de adquisición de datos también contiene una resta para eliminar el offset que se introdujo a la señal y se pueda tener la señal oscilatoria con datos con signo, este offset es aproximadamente de la mitad del rango de medición del ADC. Para mantener los datos adquiridos en formato de voltaje y no en formato crudo (bits) se aplica un multiplicación por el factor 607.5625, en este caso para la medición de voltaje. A la salida de este bloque ya se tienen las muestras en volts y ya se puede usar para obtener los cálculos que sean necesarios.

III.2.2 Control

El control del sistema se basa principalmente en la norma IEC la cual nos recomienda actualizar los dato cada cierto tiempo para realizar el cálculo de algunos índices de calidad.

La norma recomienda que es necesario realizar los cálculos con datos de 10 ciclos de la señal de 50 Hz o 12 ciclos de la señal de 60 Hz, esto es cada 200ms, es por ello que la base de tiempo para los cálculos es de 200ms.

El control también influye en el sistema de adquisición de datos y en la memoria para guardarlos, ya que la memoria RAM del FPGA es usada para almacenar los datos, el control también maneja la frecuencia de muestreo de los canales. La memoria del FPGA esta dividida en dos partes, una parte de memoria es para almacenar los datos mientras que la otra parte de la memoria se usa para realizar los cálculos de los índices de calidad de energía de tramas anteriores de adquisición. Se considera una trama como los datos que se obtienen en los 200ms por lo que si la frecuencia de muestreo es de 10.24kHz el número de datos de una trama es de 2048 muestras.

En la Figura III.9 se observa el diagrama de bloques del control, que incluye con un reloj para la frecuencia de adquisición (U1) que simplemente es un contador y cada cierto número de conteos de la frecuencia fundamental, el contador manda un pulso. También se tiene un contador de muestras, este contador verifica que el número de muestras de cada trama se cumpla (U2), así

también lleva el control de la dirección donde se tiene que guardar el dato en la memoria. Para indicar en qué memoria guardar cada trama de datos se tiene un bloque que ayudara a intercalar las memorias (U3). Para el proceso de cálculo de índices de calidad, también se tiene un bloque de control para hacer los cálculos de forma ordenada (U4), por ultimo tenemos un control central que hace que todos los demás elementos funcionen, este bloque espera a que el sistema se active y pone a funcionar a los demás bloques como se muestra en la Figura III.9

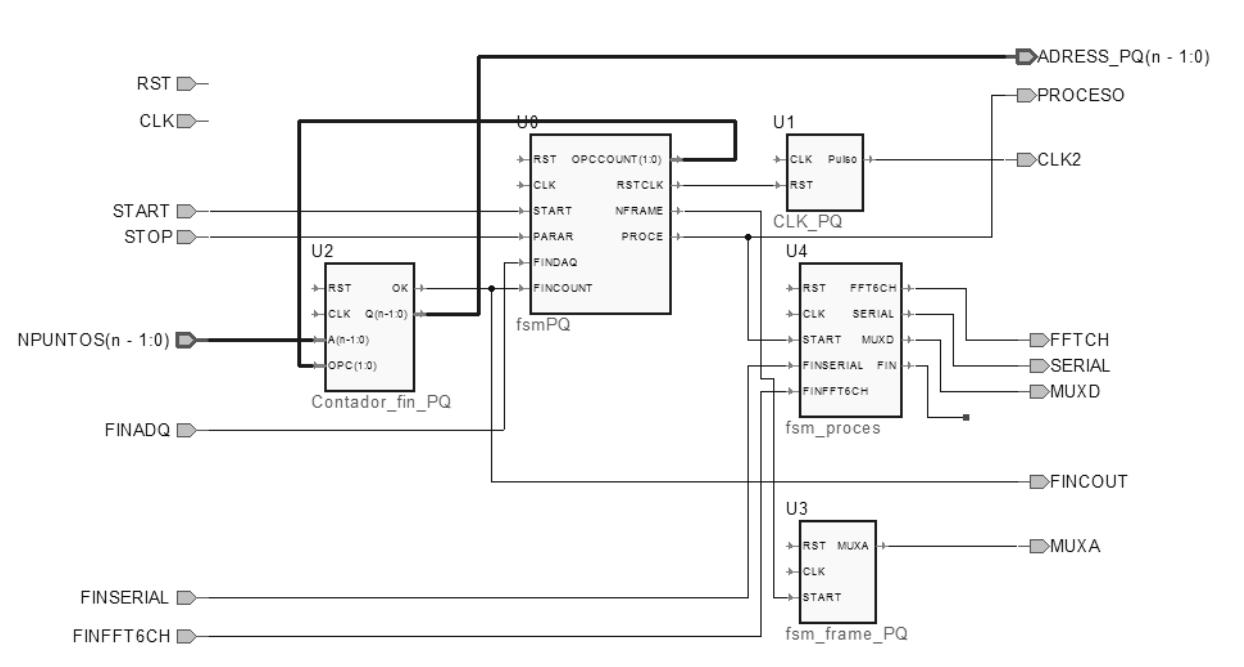


Figura III.9. Diagrama de bloques de control.

III.2.3 Cálculos de índices de calidad.

El diseño en el FPGA incluye diferentes cálculos de índices de calidad, en el trabajo se presentan los siguientes cálculos de índices de calidad para cada canal de medición, tanto de corriente como de voltaje:

- Voltaje Pico y Corriente Pico

- Voltaje RMS y Corriente RMS
- FFT (Transformada Rápida de Fourier)
- THD
- Armónicos de cada canal

Así también se implementan los cálculos de potencia, estos cálculos se hacen para cada fase de medición.

- Potencia Activa (P)
- Potencia Aparente (S)
- Factor de Potencia(FP)

El diseño de los cálculos de calidad de energía se presenta a continuación en forma de diagramas de bloques para comprender mejor el diseño.

Diseño de valor pico.

El diseño de voltaje pico se muestra en Figura III.10. El voltaje pico se obtiene comparando las muestras y manteniendo el valor mayor en cada trama. El formato de los datos esta en F10.8 es decir 10 bits decimales y 8 bits para la parte fraccionaria.

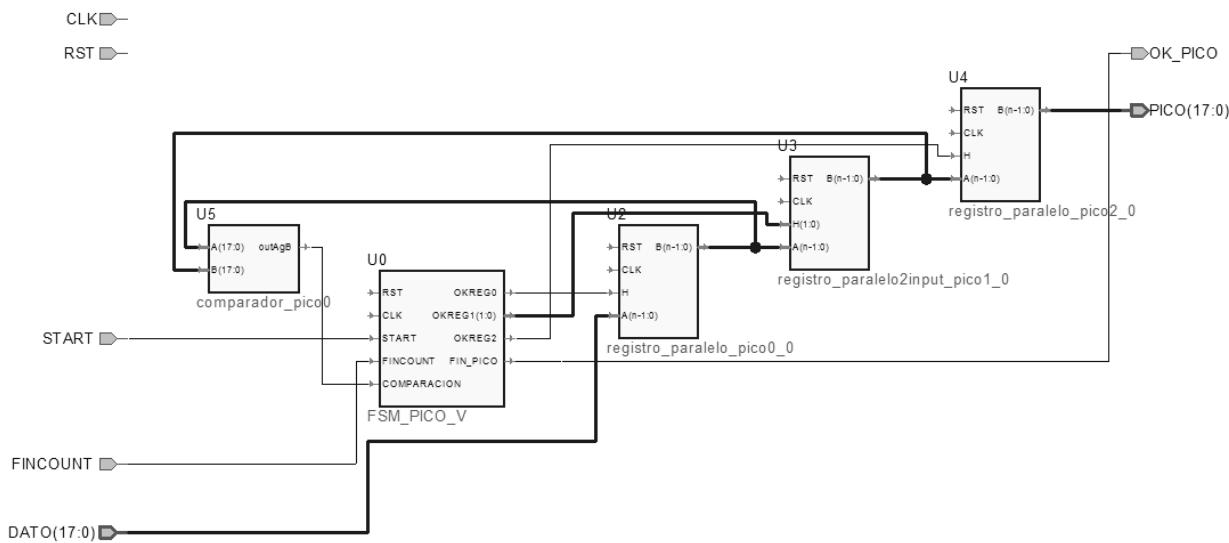


Figura III.10. Diagrama de bloques de valor pico.

El diseño incluye un comparador (U5) para comparar si el dato nuevo es mayor que el dato anterior, un registro paralelo del nuevo dato (U2) y un registro paralelo de dos entradas para seleccionar si mantener el dato anterior o el nuevo como valor máximo (U3). Y por último un registro paralelo que mantiene el resultado final de valor pico. Los datos de valor pico se actualizan cada nueva muestra adquirida, esto se hace en un corto tiempo que no importa esperar a obtener todos los datos de una trama para realizar los cálculos. El formato de bits de entrada es de 10.8 y el formato de salida es de 10.8 ya que no se realizan operaciones aritméticas y funciona para el valor pico de voltaje o de corriente.

Diseño de RMS.

El cálculo de RMS es de misma importancia que el valor pico, el diseño es diferente que respecto al valor pico, porque es necesario obtener toda la trama de datos para realizar el cálculo. El diseño en diagrama de bloques se observa en la Figura III.11.

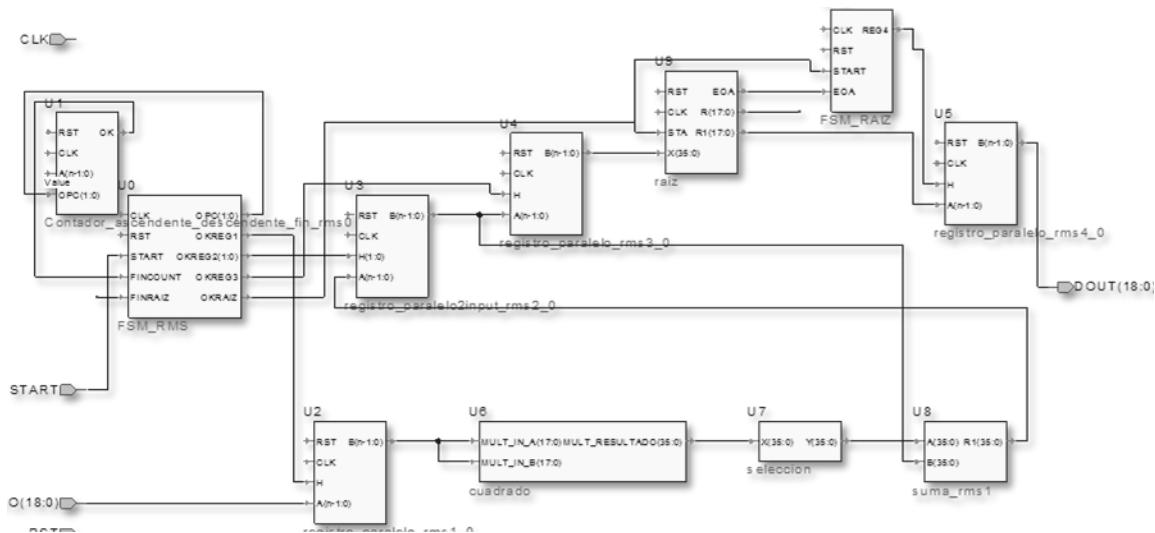


Figura III.11. Diagrama de bloques de valor RMS.

El valor RMS se obtiene mediante una sumatoria sucesiva de cada uno de los datos entrantes nuevos por cada trama de datos. La fórmula para realizar el cálculo está dada por la ecuación 2 :

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [x(n)]^2} \quad (2)$$

El cálculo de valor RMS se realiza al finalizar la adquisición de una trama de datos y en ese momento realiza la raíz cuadrada para obtener el resultado. El formato en bits de salida es de 10.8.

Transformada rápida de Fourier.

La FFT es calculada basándose en la norma IEC 61000-4-7, la norma dice que es necesaria una resolución de 5Hz por cada punto de la transformada, es por esto que el número de puntos de la transformada de Fourier es de 2048 puntos que coinciden con el número de muestras por cada trama.

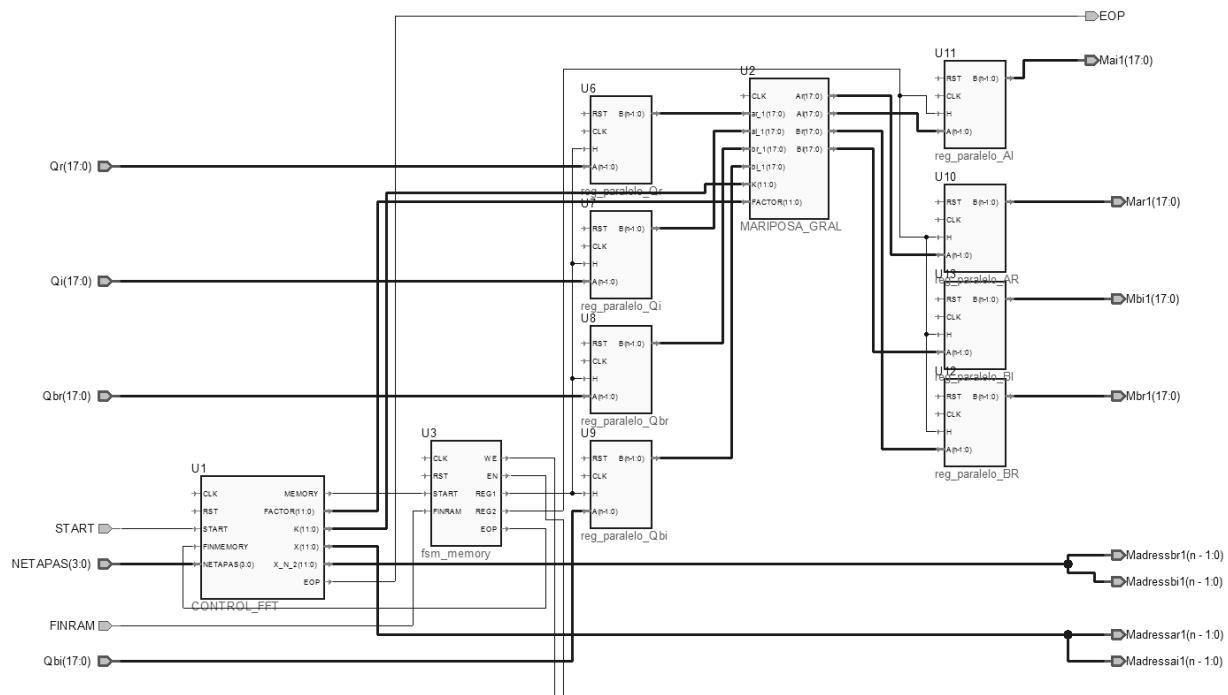


Figura III.12. Diagrama de bloques FFT.

El diseño incluye un bloque de control para los ciclos de la mariposa. La mariposa es el elemento principal para realizar el cálculo de la FFT, el bloque de la mariposa (U2) se muestra en la Figura III.12, y también incluye registros paralelos para los valores antes y después de aplicar el cálculo de la mariposa. Cabe señalar que la FFT necesita valores reales e imaginarios, estos valores se tomaron por separado y todos con un formato de bits de 10.8.

Calculo de distorsión armónica total (THD).

El diseño del valor THD viene seguido del cálculo de la magnitud de la FFT, una vez obtenido esto se manda al bloque THD que se muestra en Figura III.13.

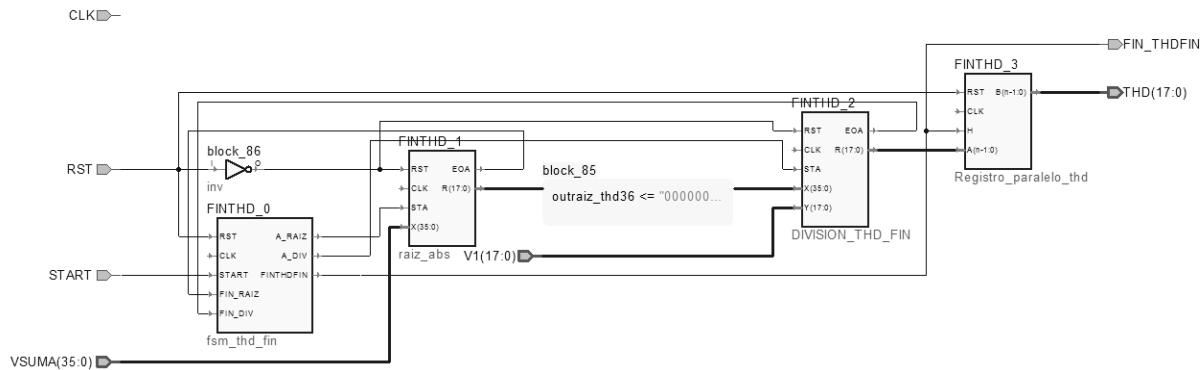


Figura III.13. Diagrama de bloques para THD.

En la Figura III.13 se observa el cálculo de raíz cuadrada y división para poder realizar el cálculo de distorsión armónica total.

Potencia activa –Potencia aparente –Factor de potencia

La potencia activa se calcula con ayuda de los resultados de la magnitud y fase de la FFT tanto del canal de voltaje como el de corriente.

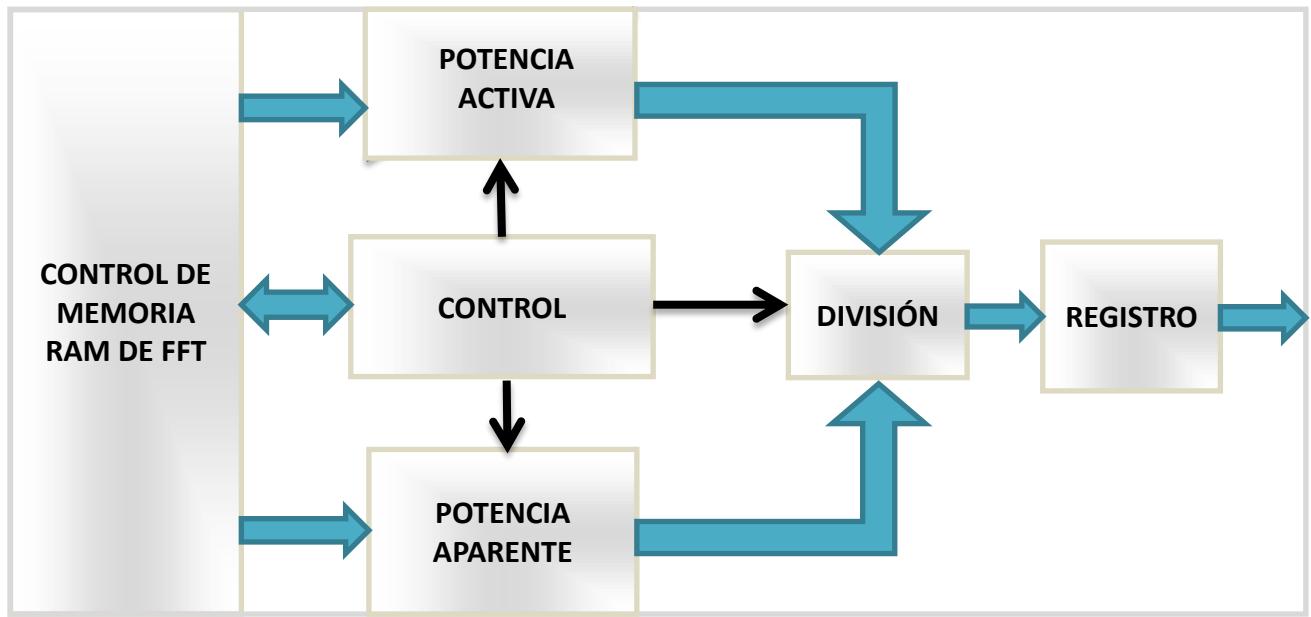


Figura III.14. Diagrama de bloques para Factor de Potencia.

En la Figura III.14 se observa el diagrama de bloques para el cálculo de factor de potencia, el cálculo incluye los índices de potencia activa y potencia aparente, ya que son necesarios para el cálculo de factor de potencia, el cálculo de factor de potencia está dada por:

$$FP = \frac{P}{S} \quad (3)$$

Dónde: P es la potencia activa y S la potencia aparente.

El cálculo de factor de potencia es derivado de la magnitud y de la fase que arrolla la transformada de Fourier, es decir el factor de potencia mide la relación entre el voltaje y la corriente de una fase. El cálculo del factor de potencia hace uso de la memoria donde el FFT guarda los datos, es por ello que se tiene un controlador para obtener estos valores y así poder obtener el Factor de Potencia.

La fórmula para el cálculo de la potencia activa está dada por la ecuación 4.

$$P = \sum_1^N V_n \cdot I_n \cdot \cos(\theta_n - \phi_n) \quad (4)$$

La fórmula para el cálculo de la potencia aparente se muestra en la ecuación 5

$$S = V_{rms} \cdot I_{rms} \quad (5)$$

Donde N es el último armónico de medición, θ_n es el ángulo de cada armónico del canal de voltaje y ϕ_n es el ángulo de cada armónico para el canal de corriente. V_n es la magnitud de cada armónico de voltaje e I_n es la magnitud de cada armónico de corriente. I_{rms} y V_{rms} son el valor RMS de los armónicos de corriente y de voltaje respectivamente.

III.2.4 Comunicación UART para trasmisión serial

La última parte de la implementación en el FPGA consiste en el envío de los resultados a un dispositivo para presentarlos. El protocolo UART es implementado, y además un bloque para transmitir los datos que están en formato 10.8 bits en tramas de 8 bits por el puerto serial. En la Figura III.15 se observa los elementos para la transmisión UART.

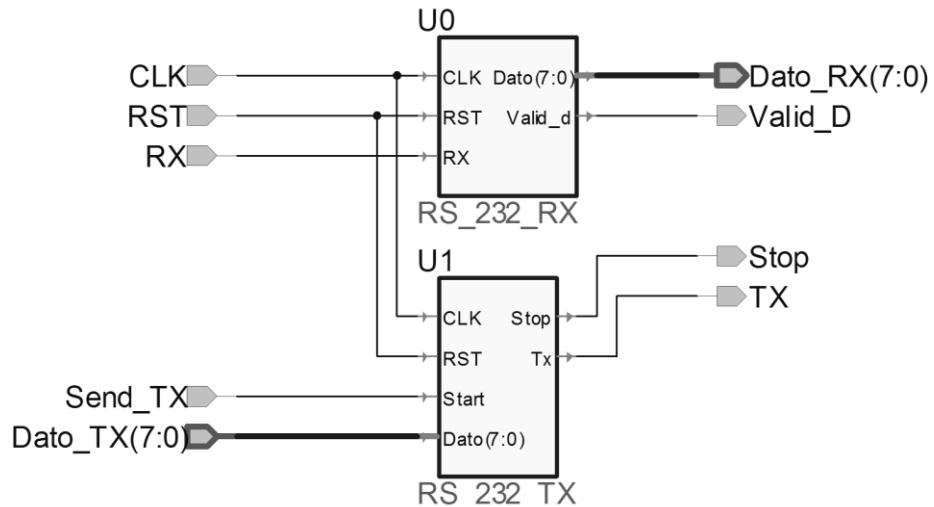


Figura III.15. Diagrama de bloques para transmisión serial.

III.3 Desarrollo de aplicación PC para comparar datos

Para comparar resultados, se realiza un aplicación para la adquisición de los datos enviados por el FPGA, la aplicación es realizada en el software LabView y se muestra en Figura III.16 los datos obtenidos para un canal de corriente y un canal de voltaje.

El diagrama de bloques de la interfaz de usuario se muestra en la Figura III.17, y muestra las etapas de conversión de los datos. El formato de envío de datos del FPGA es de 10.8bits pero son enviados en tramas de 8 bits y por eso el software tiene el protocolo para poder unir las tramas y juntar cada valor que es recibido.

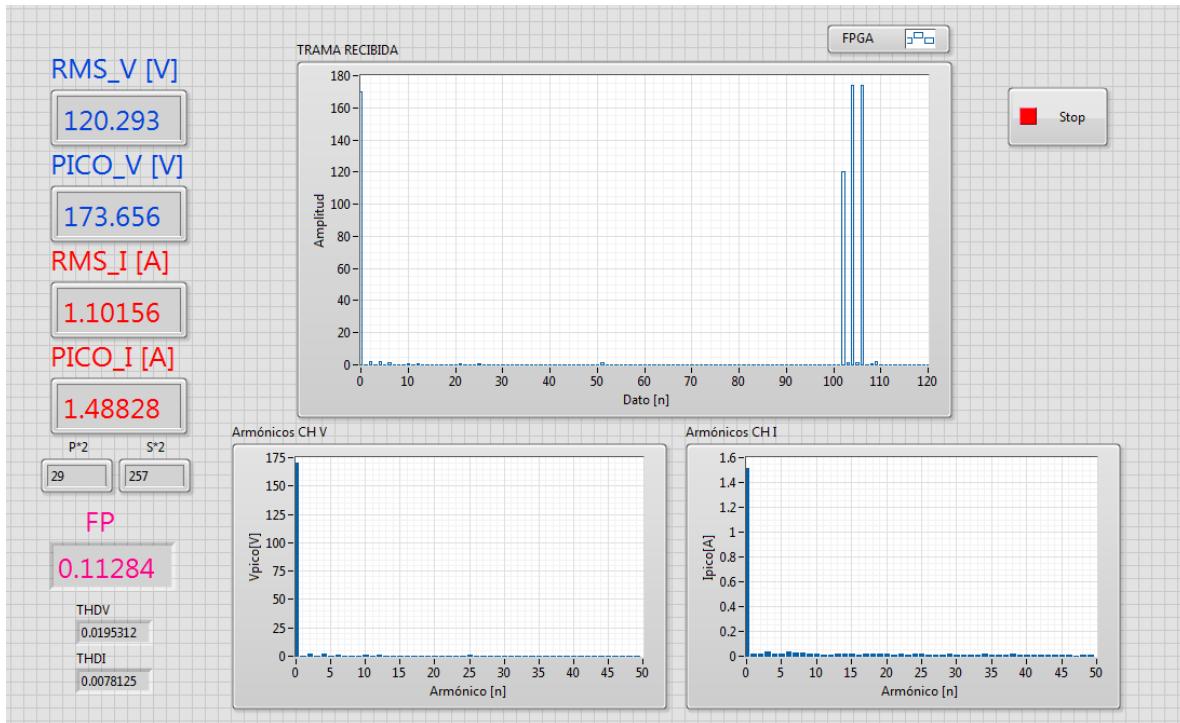


Figura III.16. Aplicación para mostrar el cálculo.

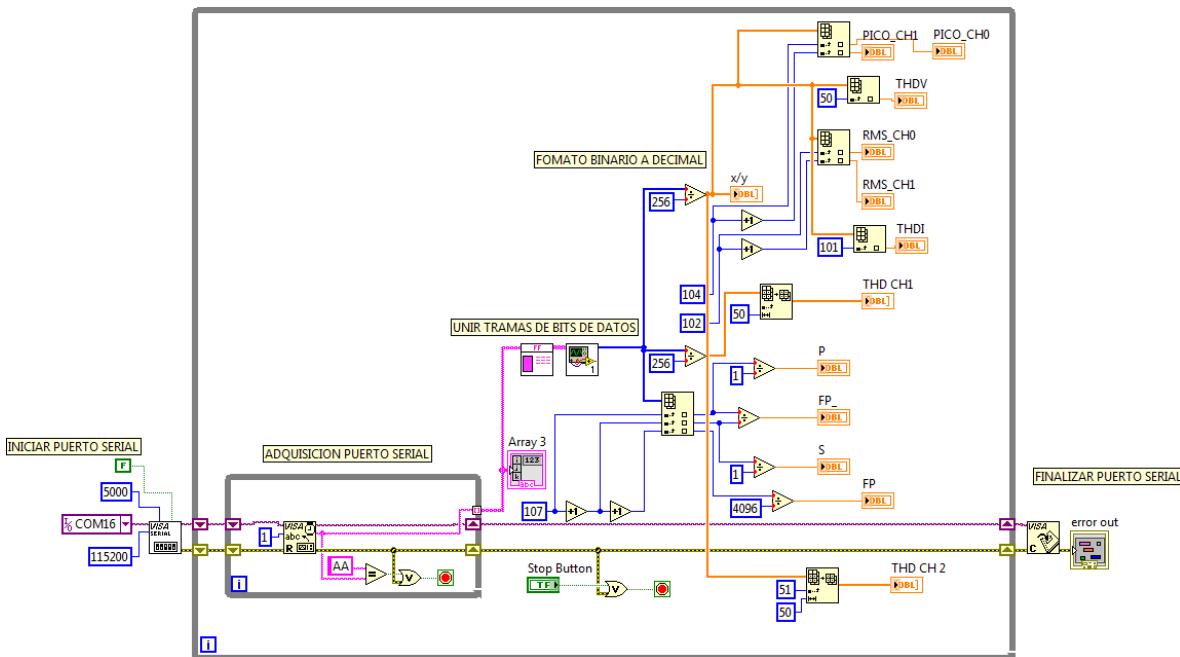


Figura III.17. Diagrama de bloques de interfaz de usuario.

III.4 Instrumentación con dispositivo FPGA y FLUKE 435

El proceso de pruebas con el sistema creado y el dispositivo comercial se desarrolla en el laboratorio de Mecatrónica de la facultad de ingeniería en la Universidad Autónoma de Querétaro, la instrumentación se da para un motor trifásico que es alimentado por un variador de amplitud trifásico.

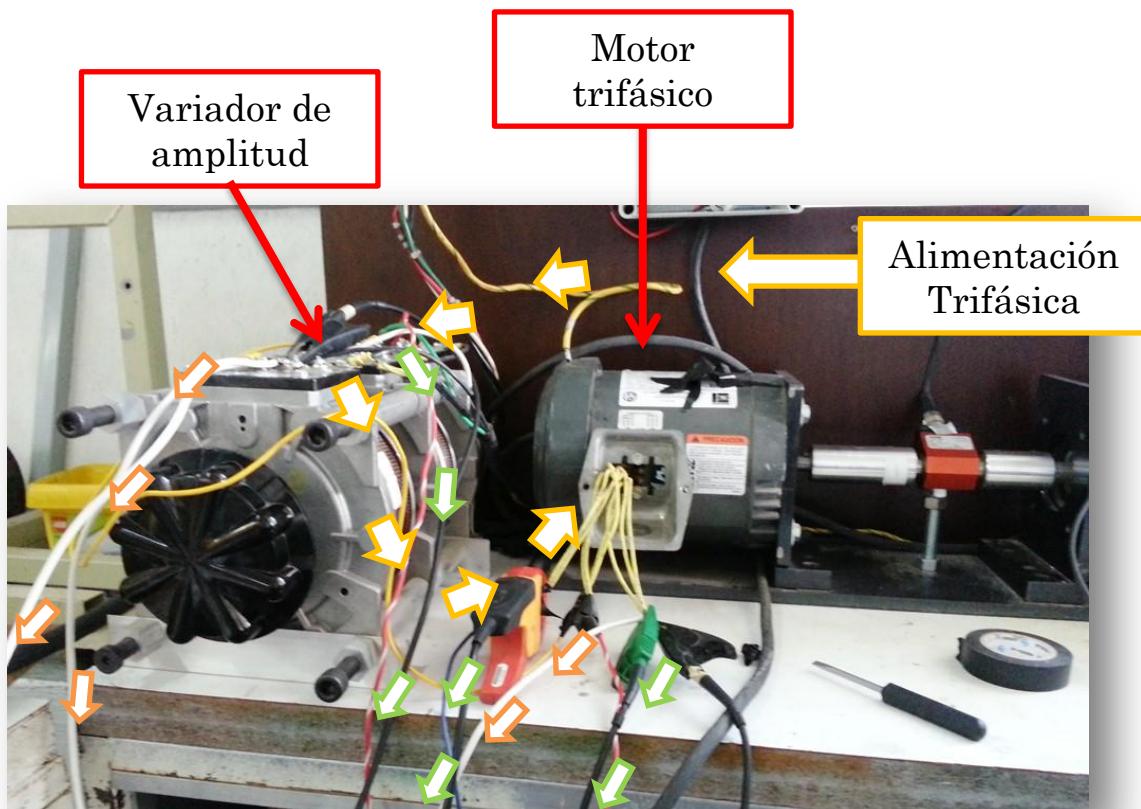


Figura III.18. Instrumentación de motor trifásico.

En la Figura III.18 se muestra con flechas amarillas el proceso de la alimentación trifásica, con flechas color naranja la conexión con el dispositivo FPGA y con flechas color verde se observa las conexiones con el analizador de calidad de energía FLUKE 435.

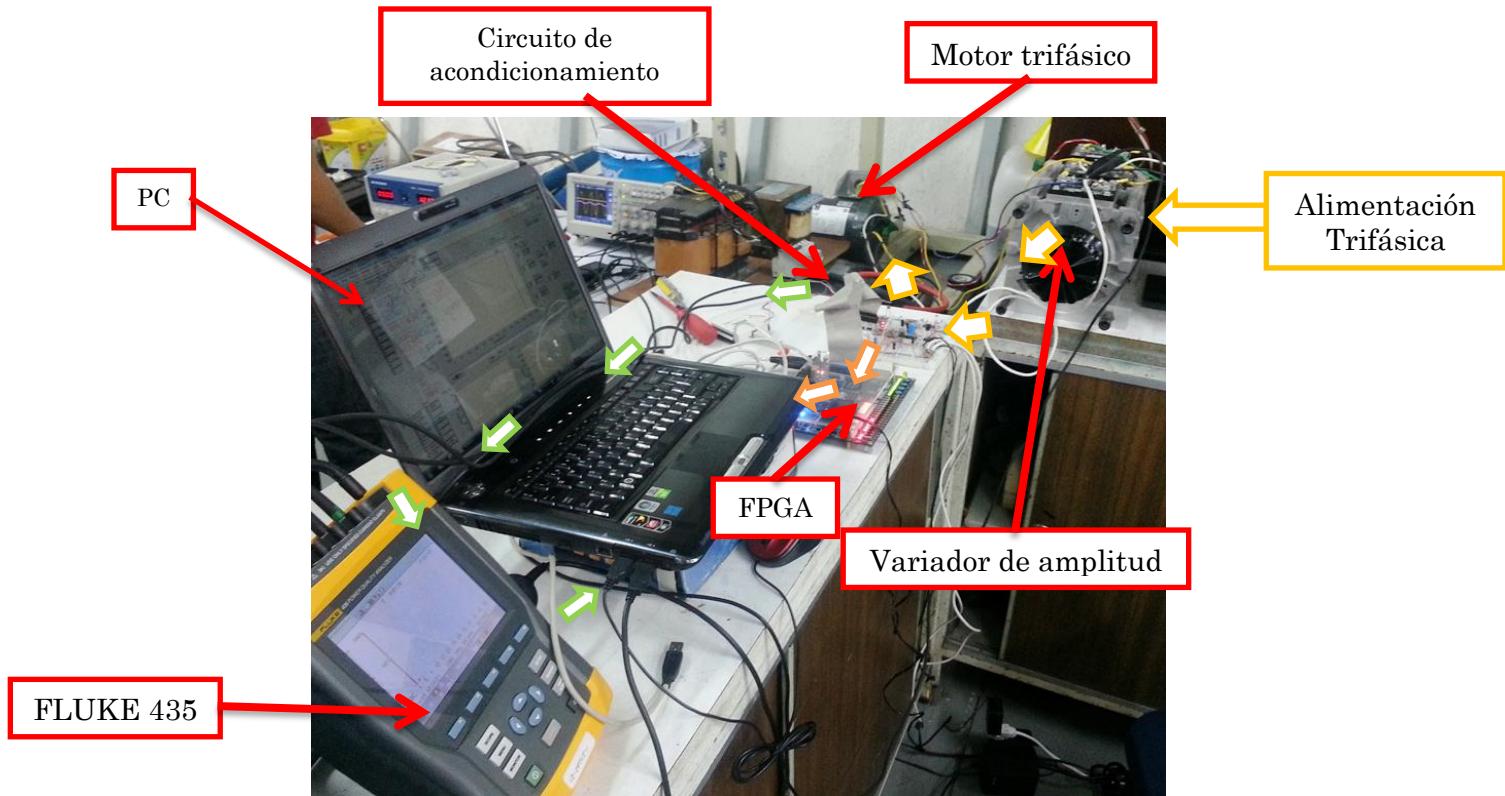


Figura III.19. Instrumentación de motor trifásico y Fluke 435.

En la Figura III.19 se observa la conexión para el analizador de calidad de energía Fluke y el basado en FPGA. Además ambos son conectados a una computadora para la adquisición de datos en ambos elementos y así poder comparar los resultados calculados.

CAPÍTULO 4:

IV RESULTADOS

Este capítulo presenta los resultados obtenidos en esta investigación. El capítulo muestra las gráficas obtenidas en las pruebas realizadas y la instrumentación aplicada al motor trifásico. Las pruebas se realizaron con el cambio de la amplitud de voltaje aplicado al motor y en la medición se obtuvieron los valores calculados tanto por el analizador comercial y el desarrollado en la investigación.

IV.1 Resultados de valor pico de voltaje

En la Figura III.19 se observa la gráfica donde se compara los datos adquiridos por el sistema basado en FPGA y el obtenido por el analizador de calidad de energía comercial FLUKE 435, el tiempo de adquisición es de 80 segundos aproximadamente donde la amplitud de voltaje varía constantemente para caracterizar mejor al sistema. En casos prácticos se considera que los datos obtenidos por el analizador Fluke es el valor de referencia para comparar los datos. El analizador Fluke arroja tres valores cada segundo, el valor máximo, medio y mínimo de cada índice de calidad de energía, para este caso el valor tomado como referencia es el valor máximo contra el obtenido por el sistema desarrollado.

Los datos arrojan un valor máximo de error absoluto de 2.62v por lo que el error relativo en ese punto es de 9.43%

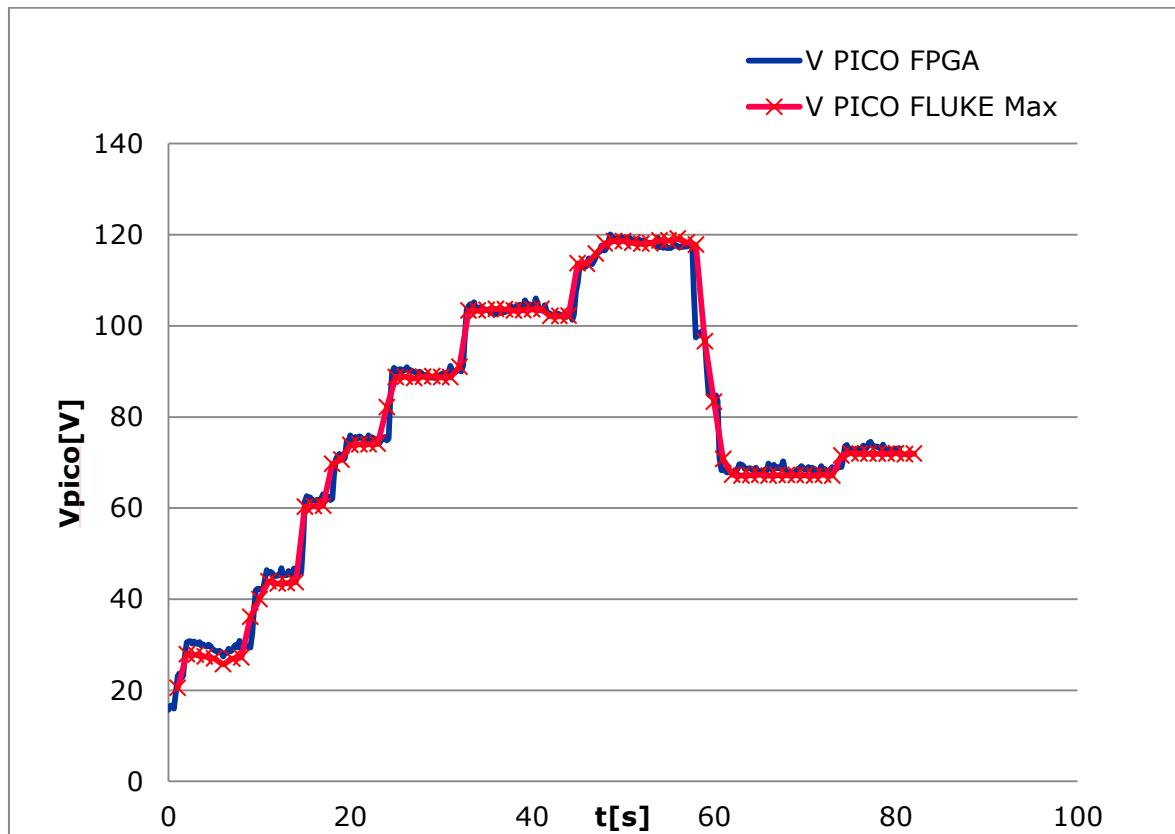


Figura IV.1. Gráfica de valor pico de voltaje.

IV.2 Resultados de cálculo RMS de voltaje

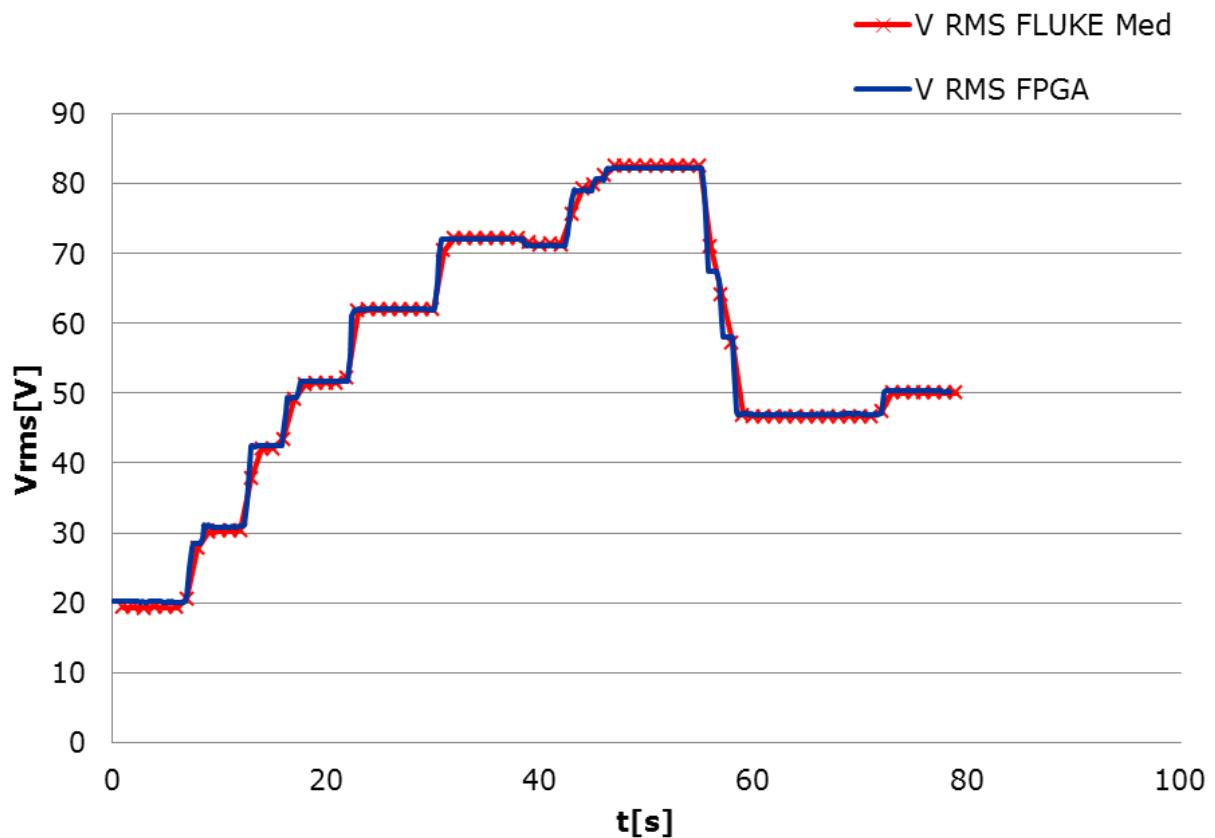


Figura IV.2. Gráfica de valor RMS de voltaje.

La Figura IV.2 muestra la gráfica donde se compara los datos adquiridos por el sistema basado en FPGA y el obtenido por el analizador de calidad de energía comercial FLUKE 435, los resultados son más estables que las de valor pico y se obtuvieron los datos por el tiempo de adquisición es de 80 segundos aproximadamente

Al comparar las gráficas los datos arrojan un valor máximo de error absoluto de 0.82v por lo que el error relativo en ese punto es de 4.06% respecto al analizador de calidad de energía comercial.

IV.3 Resultados de valor pico de corriente

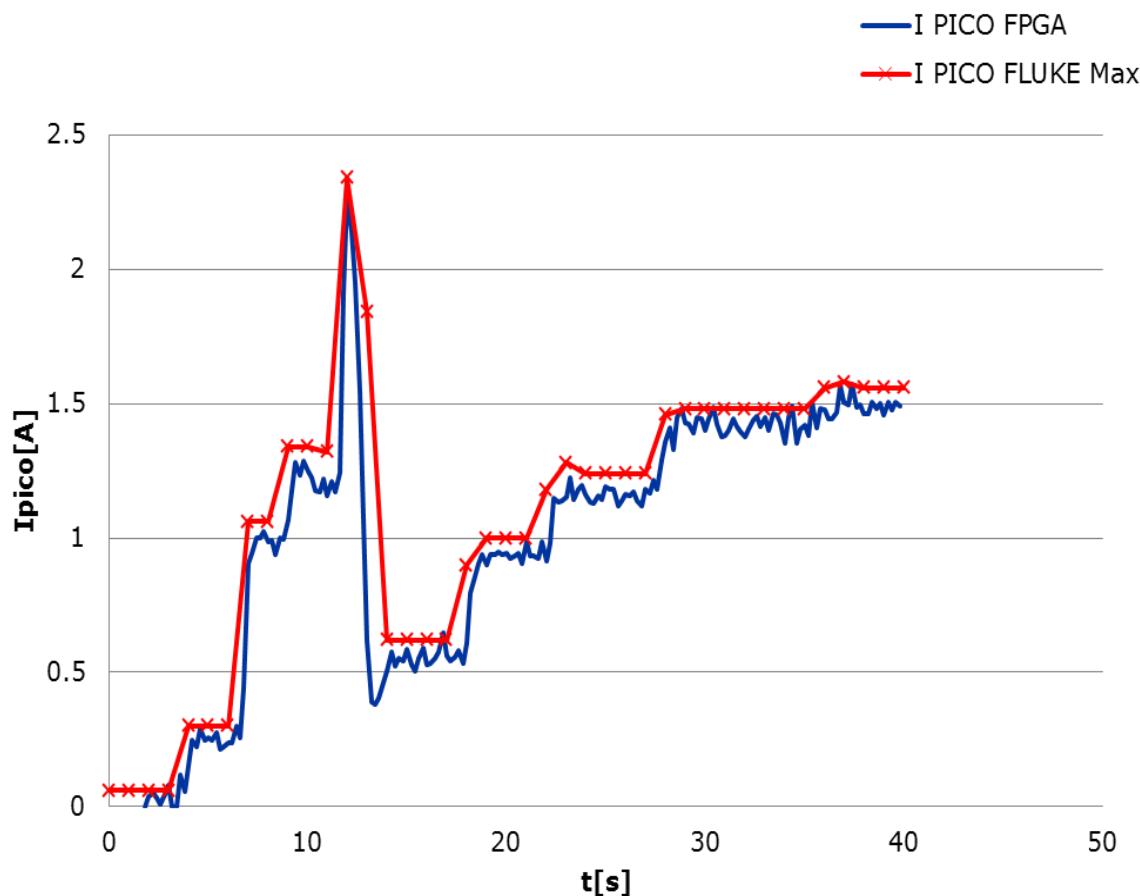


Figura IV.3. Gráfica de datos de valor pico de corriente.

La grafica de corriente pico se presenta en la Figura IV.3 Figura III.19 valor máximo de error absoluto de 0.15A por lo que el error relativo en ese punto es de 12.82% respecto al analizador de calidad de energía Fluke.

IV.4 Resultados de valor RMS de corriente

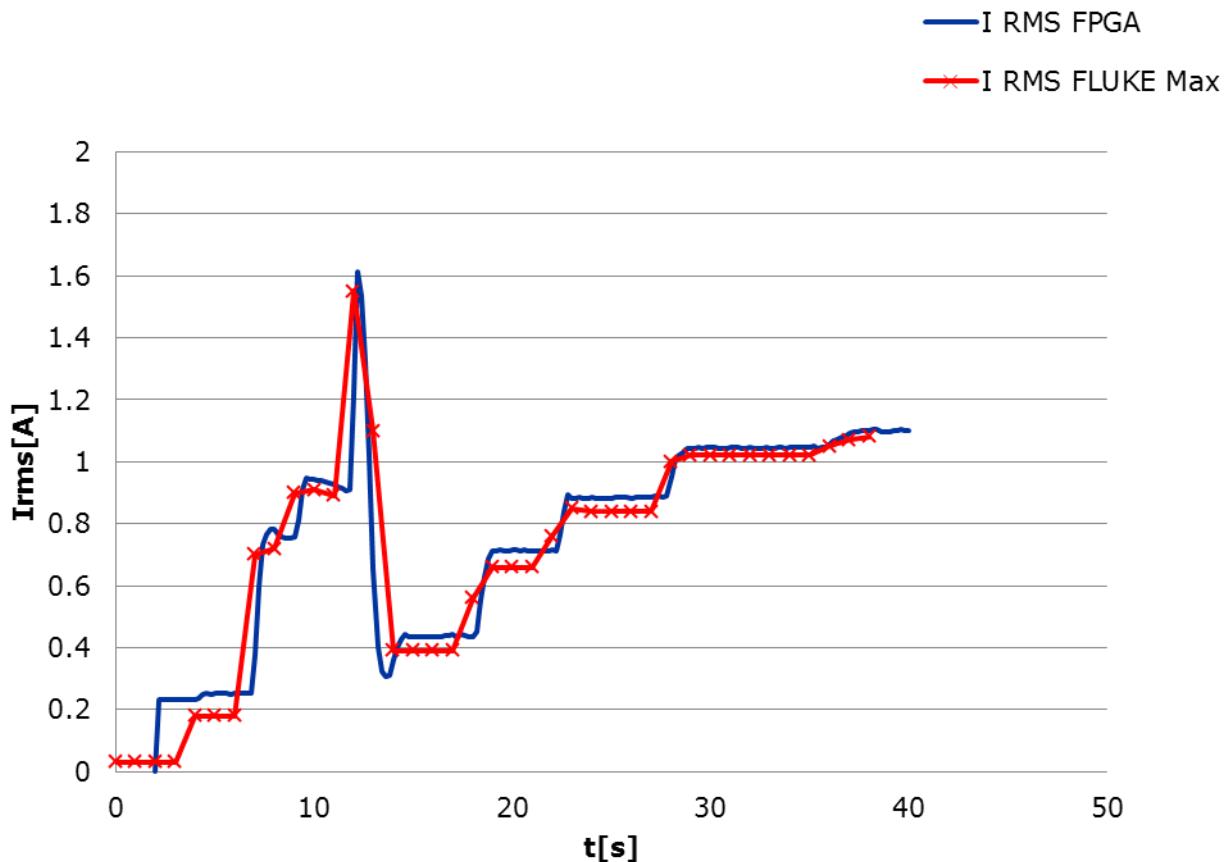


Figura IV.4. Gráfica de valor RMS de corriente.

Los resultados de la Figura IV.4 demuestran que cuando el sistema no consume corriente el sistema basado en FPGA tiene un offset de 0.2A el cual se debe al circuito de acondicionamiento, este error es considerable para mediciones de baja corriente de consumo.

IV.5 Resultados de cálculo de potencia aparente

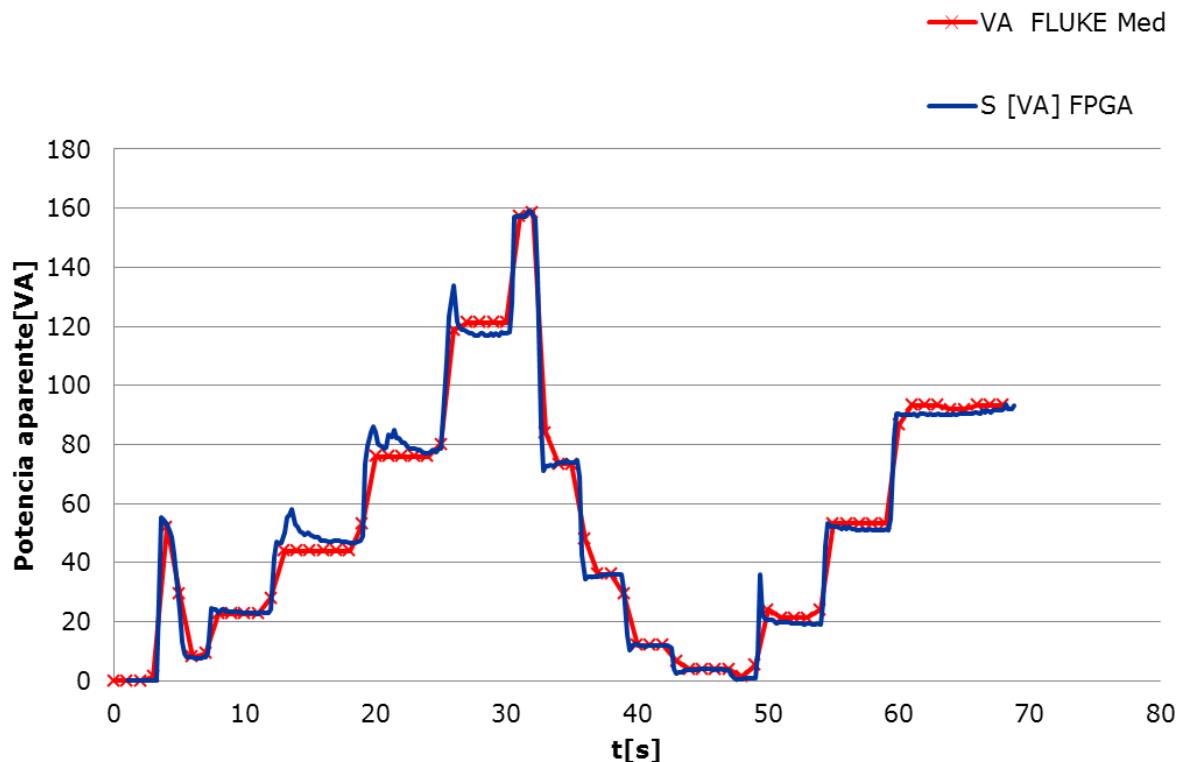


Figura IV.5. Gráfica de Potencia Aparente.

Los resultados de Potencia aparente son valores muy cercanos al momento de comparar las gráficas, dado que los datos que arroja el sistema Fluke son valores medios, en los cambios abruptos se ve una mayor diferencia, en este caso la diferencia máxima de la potencia aparente es de 10.5 VA.

IV.6 Resumen de resultados

En la Tabla IV.1 se describen los resultados de las mediciones de forma numérica, aquí se puede observar el porcentaje de error respecto al límite de la medición y poder obtener el error que represente al sistema completo.

Tabla IV.1 Tabla de resultados y errores de medición

Canal	Medición	Error absoluto	Capacidad de medición	%error respecto a capacidad de medición
V	Pico	2.64V	300V	0.88
V	RMS	0.82V	212V	0.386792
I	Pico	0.15A	30A	0.5
I	RMS	0.2A	21.21A	0.942951

Se puede observar de la gráfica, que los errores son menores al 1% en medición de transitorios respecto al rango de medición del sistema.

CAPÍTULO 5:

V CONCLUSIONES Y PROSPECTIVAS

Un parámetro fundamental para el correcto funcionamiento del sistema es el circuito de acondicionamiento, su adecuado diseño puede disminuir los errores de medición así como mejorar la calidad del sistema de monitoreo. El circuito de acondicionamiento bien efectuado puede realizar un sistema robusto y de mejor aplicación, para proyectos futuros se recomienda un mayor estudio sobre el circuito de acondicionamiento de señal para disminuir el ruido y mejorar la capacidad de medición a límites mayores, así también reducir el número de elementos del circuito.

Las normas aplicadas en la investigación son de gran importancia para la comparación de resultados entre dispositivos de medición, así también son indispensables para el uso correcto de las mediciones y cálculos necesarios. Las normas son parte fundamental para orientar al usuario que necesite aplicar un análisis de calidad de energía o bien crear un dispositivo para medirla.

Un sistema basado en FPGA es una opción viable para el desarrollo de equipos de medición de la calidad de energía. Esta tecnología cuenta con capacidad de reconfigurar el sistema si es necesario y además ayuda a evitar altos costos de equipos comerciales.

El trabajo futuro para el proyecto es agregar mas cálculos de índices de calidad de energía, como son los cálculos de los eventos, y así también guardar la información en una memoria para ser descargada posteriormente cuando el usuario lo necesite, además que se podría aumentar la frecuencia de muestreo para medir eventos de muy pequeña duración.

BIBLIOGRAFÍA

Alves, R., Goncalves, D., Pinto, J.G., Batista, J. y Afonso, J.L. "Development of an Electrical Power Quality Monitor based on a PC," *Industrial Electronics, 2009. IECON '09. 35th Annual Conference of IEEE*, pp.3649,3653, 3-5 Nov. 2009.

Bollen M.H.J.. 2003. What is power quality?. Electric Power Systems Research, Volume 66, no. 1, July 2003, pp. 5 - 14.

Camilo Quintáns, María José Moure, María Dolores Valdés Peña, y Enrique Mandado, A Virtual Instrumentation Laboratory Based on a Reconfigurable Coprocessor, IEEE Transactions on instrumentation and measurement, vol. 55, no. 2, april 2006.

Cristina Gherasim, Jeroen Van den Keybus, Johan Driesen, Member y Ronnie Belmans. 2004. DSP Implementation of Power Measurements According to the IEEE Trial-Use Standard 1459

Delle Antonio, Gallo Daniele,Landi Carmine y Luiso Mario, Power-Quality Monitoring Instrument With FPGA Transducer Compensation, IEEE transactions on instrumentation and measurement, vol. 58, no. 9, september 2009. .

Ferrignol L., C. Landi2 y M. Laraccal, FPGA-based Measurement Instrument for Power Quality Monitoring according to IEC Standards, IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Victoria, Vancouver Island, Canada, May 12-15, 2008.

Fuchs Ewald y Masoum Mohammad. Power Quality in Power Systems and Electrical Machines. 2008. pp 1.

Granados, D; , Romero, R. J. ; Cabal, E. ; Osornio, R. A. ; Franco, L. A. 2009. “A real-time smart sensor for high-resolution frequency estimation in power systems,” Sensors- Basel, vol. 9, pp. 7412-7429.

Krzysztof Górecki, Mirosław Szmajda y Janusz Mroczka Adaptive digital synchronization of measuring window in low-cost DSP power quality measurement systems. 2007

Lara Cardoso J., y Romero Troncoso R. J. Low-cost power harmonics analyzer of nonlinear loads based on FPGA. Proc. 2008 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conf., pp. 730-735

Mohammed E Salem, Azah Mohamed, Salina Abdul Samad y Oswald Jones. DSP Implementation of Power Quality Disturbance Analysis Using Continuous Wavelet Transform ., First International Power and Energy Conference 2006 November 28-29, 2006, Putrajaya, Malaysia.

Massimo Aiello. 2004. A Low Cost and Easy Re-configurable Instrument for Power Quality Survey - Instrumentation and Measurement Technology Conference. Italy, 18-20 May 2001.

Massimo Aiello ; Antonio Catalotti y Salvatore Nuccio. A PC-based instrument for harmonics and interharmonics measurement in power supply systems, Measurement 35 (2004) 371–380.

Olev Mirtens, Trampirk Harr, Aivar Liimet. DSP-based Power-Quality Monitoring Device. 2007 IEEE.

Romero Troncoso, R.J.; Cabal Yepez, E.; Garcia Perez, A.; Osornio Rios, R.A.; Alvarez Salas, R.; Granados Lieberman, D.; 2011. "Reconfigurable instrument for power quality monitoring in 3-phase power systems," Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics & Drives (SDEMPED), IEEE International Symposium, pp.186-191, 5-8 Sept. 2011

Zain-ul-Abdin, Bertil Svensson. 2008. Evolution in architectures and programming methodologies of coarse-grained reconfigurable computing. Microprocessors and Microsystems. 33 (2009), pp. 161-178.