



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de ingeniería

Campus San Juan del Río

Metodología de calibración para equipo de monitoreo eléctrico propietario
PQ-UAQ.

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestría en ciencias (Mecatrónica)

Presenta:

Bernardo Fernández Negroe

Asesor:

Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos

San Juan del Río, Querétaro. Noviembre de 2016



Universidad Autónoma de Querétaro
 Facultad de Ingeniería
 Especialidad en Mecatrónica

Metodología de calibración para equipo de monitoreo eléctrico propietario PQ-UAQ.

Opción de titulación
Tesis o Publicación de artículos

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

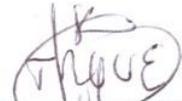
Presenta:

Bernardo Fernández Negroe

Dirigido por:

Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos

Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos
 Presidente


 Firma

Dr. Ángel Luis Zorita Lamadrid
 Secretario


 Firma

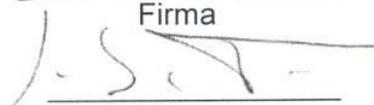
Dr. Luis Morales Velázquez
 Vocal

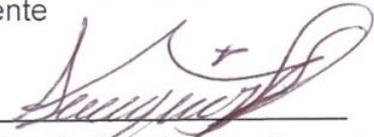

 Firma

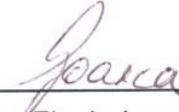
Dr. Arturo Yosimar Jaen Cuellar
 Suplente


 Firma

Dr. Rene Romero Troncoso
 Suplente


 Firma


 Dr. Aurelio Domínguez Gonzales
 Director de la Facultad


 Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
 Directora de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
 Querétaro, Qro.
 Fecha Noviembre 2016

Resumen

En la actualidad existen varios dispositivos dedicados a la calidad de la energía disponibles en el mercado y la importancia de mantener la calidad de la energía está creciendo en popularidad, sin embargo el alto costo de estos equipos de monitoreo de la calidad de la energía limita su uso tanto en la industria como en compañías consultoras. Estos equipos de calidad de la energía usualmente no son flexibles en su configuración ni en su forma de presentar sus resultados del monitoreo. En este trabajo se presenta la calibración estadística y el cálculo de la confiabilidad de un equipo de monitoreo de la calidad de la energía basado en FPGA y desarrollado por la Universidad Autónoma de Querétaro llamado PQ-UAQ, para esto se desarrolló un software capaz de tomar los datos de las lecturas del equipo y compararlos con mediciones hechas por un equipo de jerarquía metrológica más alta usando métodos estadísticos, luego las lecturas ya corregidas fueron comparadas entre ellas para determinar dos tipos de confiabilidad usando otros métodos estadísticos.

(Palabras clave: Calibración estadística, medición eléctrica, calidad de la energía, análisis de errores, confiabilidad.)

Summary

At present there are several devices dedicated to power quality available in the market and the importance of maintaining a good power quality is spreading, however the high cost of these power quality has limited their usage by the industry and consultant companies. These power quality devices are not flexible in their configuration and in their way to present results. Presented in this work is the statistical calibration and the reliability analysis of a power quality monitoring device base don FPGA and developed by the Universidad Autónoma de Querétaro called PQ-UAQ, to achieve this a software was developed capable of taking the data generated by the device and compare them with the measurements taken by a device of higher metrological hierarchy using statistical methods, then the calibrated values were compared amongst them using other statistical methods to determine two types of reliability.

(Keywords: Statistical calibration, electric measurement, power quality, error analysis, reliability.)

Agradecimientos

Al CONACYT por brindar apoyo económico durante la duración del programa de estudios.

A la Universidad Autónoma de Querétaro por haberme brindado los materiales y la instrucción durante el programa.

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	9
1.1 ANTECEDENTES.....	9
1.1.1 Calidad de Energía	9
1.1.2 Calibración de equipos de calidad de energía	10
1.1.3 Calibración de convertidores de analógico a digital	10
1.1.4 Confiabilidad Test-Retest	12
1.2 DESCRIPCIÓN DE PROBLEMA.....	12
1.3 OBJETIVOS.....	13
1.3.1 Objetivo General	13
1.3.2 Objetivos Particulares	13
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	14
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	15
2.1 CALIDAD DE LA ENERGÍA	15
2.1.1 EN 50160.....	15
2.1.2 IEEE 1159	16
2.2 CONVERTIDOR DE ANALÓGICO A DIGITAL Y DE DIGITAL A ANALÓGICO.....	16
2.3 FPGA.....	16
2.3.1 Arquitectura de FPGAs	17
2.4 CALIBRACIÓN.....	20
2.4.1 Calibración Estadística	20
2.4.2 Error de Offset	21
2.4.3 Error de Ganancia	22
2.5 CONFIABILIDAD	24
2.5.1 Coeficiente de Correlación Momento-Producto de Pearson	25
2.5.2 Coeficiente de correlación de Spearman	26

2.5.3	Coeficiente de correlación intraclase	26
2.5.4	Coeficiente kappa	27
3.	METODOLOGÍA.....	28
3.1	DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO PQ-UAQ.....	29
3.2	CALIBRACIÓN.....	31
3.2.1	Montaje de las pruebas.....	31
3.2.2	Preprocesamiento	32
3.2.3	Software de calibración.....	32
3.3	CÁLCULO DE CONFIABILIDAD.....	33
3.3.1	Implementación en software	34
4.	RESULTADOS	35
5.	CONCLUSIONES.....	40
6.	ANEXO CÓDIGOS	47

Índice de Tablas

Tabla 2.1	25
Tabla 3.1 Características del ADC	30
Tabla 4.1 Coeficientes de ganancia	35
Tabla 4.2 Coeficientes de offset	35
Tabla 4.3 Porcentajes de error en canales de tensión	37
Tabla 4.4 Porcentajes de error en canales de corriente	37
Tabla 4.5 Coeficientes de confiabilidad en canales de tensión.....	38
Tabla 4.6 Coeficientes de confiabilidad en canales de corriente	38
Tabla 4.7 Coeficientes de confiabilidad en canales de tensión.....	38
Tabla 4.8 Coeficientes de confiabilidad en canales de corriente	39

Índice de Figuras

Figura 2-1 Arquitectura genérica de un FPGA (Zeidman Bob 2006)	18
Figura 2-2 Bloque de lógica configurable de un FPGA (Zeidman Bob 2006)	18
Figura 2-3 Bloque de entrada y salida configurable (Zeidman Bob 2006)	19
Figura 2-4 Error de Offset	22
Figura 2-5 Error de Ganancia	23
Figura 3-1 Diagrama general de bloques.....	28
Figura 3-2 Desarrollo del cálculo de confiabilidad	29
Figura 3-3 Tarjeta PQ-UAQ.....	30
Figura 3-4 Instalación de la prueba.....	31
Figura 3-5 Preprocesamiento.....	32
Figura 3-6 Interfaz gráfica.....	33
Figura 4-1 Graficas de tensión.....	36
Figura 4-2 Graficas de corriente	37

Índice de ecuaciones

Ecuación 2.1	22
Ecuación 2.2	23
Ecuación 2.3	24
Ecuación 2.4	25
Ecuación 2.5	26

Ecuación 2.6	26
Ecuación 2.7	27
Ecuación 2.8	27

1. Introducción

1.1 Antecedentes

1.1.1 Calidad de Energía

La calidad de la energía es la normalización de las propiedades de transmisión eléctricas para la que los sistemas eléctricos están diseñados por lo que mantenerla ayuda al funcionamiento óptimo de dichos sistemas. Alrededor del mundo conforme crece la demanda eléctrica crece también la necesidad de mantener dicha normalización para mantener el buen funcionamiento de los equipos eléctrico por lo que cobra más importancia el monitoreo de la calidad de la energía. El Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (IEEE) respondió a esta necesidad aprobando el estándar para el monitoreo de calidad de energía cuyo fin es reducir las perturbaciones generadas por componentes electrónicos, las cuales deterioran la calidad de la energía y por consiguiente generan pérdidas económicas.

Con el aumento en relevancia de la investigación sobre calidad de energía, en su monitoreo y su corrección se han publicado varios trabajos a niveles tanto internacionales como locales como el de Flores (2002) quien publicó una clasificación de los posibles eventos en redes eléctricas que pueden afectar la calidad de energía. Valtierra-Rodriguez et al. (2013) publicaron su desarrollo de una red neuronal basada en FPGA que monitorea continuamente los armónicos e interarmónicos en redes eléctricas industriales. Romero-Troncoso et al. (2011) desarrollaron un instrumento reconfigurable que evalúa índices de calidad de energía en señales trifásicas transitorias o estacionarias en sistemas de poder. Granados-Lieberman et al. (2013) propusieron un sensor inteligente basado en la transformada Hilbert para detectar disturbios en la calidad de energía de una red eléctrica que luego son clasificados en una red neuronal, y por último cuantificados usando la transformada Hilbert y el teorema de Parseval. Granados-Lieberman et al. (2013) investigaron los efectos de caídas de voltaje en el torque de motores

eléctricos de máquinas de control numérico y sus efectos negativos en el acabado de piezas maquinadas por esos motores mediante mediciones de torque y de rugosidad al aplicar disturbios controlados.

1.1.2 Calibración de equipos de calidad de energía

Una de las necesidades más importantes dentro del monitoreo de la calidad de la energía es el desarrollo de instrumentos de medición, instrumentos que deben ser calibrados para poder cumplir su propósito de manera adecuada. Referente a métodos de calibración en instrumentos completos existen una buena cantidad de propuestas como la de Ferrero et al. (2002) quienes desarrollaron un procedimiento para calibrar Instrumentos para medición de calidad de energía basado en el método Monte Carlo que determina la función de densidad de probabilidad de cada dispositivo en el sistema desde la entrada de las señales hasta la conversión con la ayuda de un calibrador Fluke 5500 que genera los valores de referencia. Ramos et al. (2006) propusieron un método de calibración para sensores de voltaje y corriente en mediciones de calidad de energía basado en la respuesta de los sensores a valores de corriente directa aplicados por el calibrador Wavetek 9100, un software basado en LabVIEW y XML ayuda en la adquisición de datos. Hao et al. (2009) publicaron su investigación sobre un sistema de calibración multifunción para calidad de energía que integra programación virtual de instrumentos y electrónica de potencia para conseguir una adquisición rápida de datos digitales. Chen (2012) desarrolló una plataforma de pruebas de calibración para equipos de monitoreo de calidad de energía para la integración de energía eólica en las redes.

1.1.3 Calibración de convertidores de analógico a digital

Dentro de los instrumentos dedicados a la calidad de energía los convertidores analógico digitales (ADC) son frecuentemente el elemento central por lo que su calibración tiene una elevada importancia. Gatti et al. (1999) presentaron una técnica para calibración con un método estadístico que determina

las características reales de transmisión de un ADC de alta velocidad y alta resolución fuera de línea y funciona con solo hardware a nivel PCB. Nuzzo et al. (2006) desarrollaron un método de calibración eficiente a través del modelado estadístico del comportamiento de un ADC de alta velocidad y bajo poder. Vito et al. (2008) publicaron un esquema mejorado para la corrección de errores en ADC basado en una aproximación bayesiana. Jalili et al. (2011) propusieron una técnica de calibración del error no lineal en un ADC que mide y cancela su offset. Tsang et al. (2008) presentaron una metodología de calibración como proceso secundario que usa un ADC sigma delta para calibrar el ADC principal en dominio digital. Yin et al. (2011) desarrollaron un método de calibración para ADC que considera el error en segundo orden midiendo el desfase del tiempo entre los canales del ADC. Provost & Sánchez-Sinencio (2004) publicaron un esquema de auto calibración para ADC con arquitectura pipeline que genera una señal de rampa, mide la respuesta y extrae los coeficientes para la calibración. Huang et al. (2009) propusieron un método de calibración para ADC con arquitectura pipeline capaz de probar la calibración que se basa en la discrepancia entre capacitores y el offset. Chen et al. (2005) presentaron un método de auto calibración en el fondo para ADC de alta velocidad con arquitectura pipeline que no necesita señal de prueba. Yuan et al. (2012) publicaron el desarrollo de una arquitectura de calibración basada en interpolación para ADC con arquitectura pipeline. Roy et al. (2013) desarrollaron una técnica de calibración para ADC con arquitectura pipeline que se enfoca en las discrepancias entre capacitores. Tavassoli & Shoaie (2006) publicaron un método de calibración digital para ADC con arquitectura pipeline basado en la propiedad de distribución estadística de la entrada la cual asume es conocida. Adel et al. (2014) propusieron un método para calibrar un ADC de alta velocidad con arquitectura pipeline usando un ADC con arquitectura Split. McNeill et al. (2011) presentaron un metodo de calibracion por aproximacion sucesiva para un ADC con arquitectura split que hace énfasis en la discrepancia de capacitores. De Venuto & Reyneri (2007) desarrollaro una estrategia para calibracion y prueba rapidas completamente digital para ADC tipo sigma delta.

La calibración ha sido una necesidad constante para el uso óptimo de los ADC a través de los años y debido a esto se ha desarrollado una amplia variedad de métodos para conseguirla, algunos de estos métodos enfocados al monitoreo de calidad de energía, sin embargo. El uso de FPGA en este ámbito es poco difundido y los ejemplos integrándolo con software son aún más escasos.

1.1.4 Confiabilidad Test-Retest

También llamada repetibilidad test-retest, se refiere a la consistencia de las medidas de un instrumento, un instrumento con alta confiabilidad entrega medidas similares al aplicarse en condiciones similares. Esta propiedad es más comúnmente analizada en el campo de la psicometría pero ha sido analizada anteriormente en instrumentos de medición electrónicos como Suárez-revelo et al. (2015) que analizaron la confiabilidad de registros electroencefalográficos usando el coeficiente de correlación múltiple. Xiang et al. (2008) calcularon la confiabilidad de las lecturas superficiales de una electromiografía usando la correlación intraclass. Zijdenbos & Benoit (1993) presentaron un índice de concordancia entre la confiabilidad de segmentaciones de imágenes por resonancia magnética realizadas de forma manual y de forma semiautomática usando el coeficiente kappa.

1.2 Descripción de Problema

El buen funcionamiento de equipos y sistemas en la red eléctrica se ha visto comprometido en la actualidad debido en su mayoría a problemas en la alimentación eléctrica, estos eventos no deseables en el suministro eléctrico pueden ser causados por otros equipos conectados a la misma red, por problemas con la distribución eléctrica o fenómenos naturales como los rayos y pueden afectar diversos equipos como sistemas de cómputo elevadores, escaleras eléctricas, etc. Equipos con motores de inducción son comúnmente los más afectados.

Conforme las fuentes de efectos negativos sobre la calidad de la energía se hacen más comunes y la necesidad de mantener dicha calidad aumente han

surgido varias opciones comerciales para combatir el problema, todas con la constante de ser sistemas cerrados que no permiten modificación no están basados en estándares específicos, y tienen un costo elevado a menudo resultando no ser viables para las empresas pequeñas u organizaciones sin fines de lucro, por lo que la Universidad Autónoma de Querétaro ha iniciado el desarrollo del dispositivo de monitoreo de calidad de energía PQ-UAQ, dispositivo basado en FPGA que será capaz de monitorear la calidad de varios canales de energía y para su correcto funcionamiento necesitara una calibración adecuada.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Realizar la calibración de un equipo propietario enfocado al monitoreo de la calidad de la energía y calcular la confiabilidad de las lecturas del equipo antes y después de la calibración.

1.3.2 Objetivos Particulares

1.- Generar las herramientas hardware-software basadas en software libre para calibración del equipo PQ-UAQ.

2.- Determinar los requerimientos para seleccionar la metodología de cálculo de confiabilidad adecuado según las características y aplicaciones del equipo PQ-UAQ.

3.- Analizar diversas metodologías fundamentadas en herramientas estadísticas para determinar un método de cálculo de confiabilidad.

4.- Comparar la confiabilidad del equipo previa a la calibración con la confiabilidad posterior a la calibración.

1.4 Justificación

La importancia del desarrollo del equipo de monitoreo de calidad de energía PQ-UAQ radica en que un equipo capaz de realizar el monitoreo y detección de disturbios así como la identificación del origen de los disturbios no ha sido reportado anteriormente por lo que implica un desarrollo tecnológico, además de que traerá beneficios importantes a los usuarios en los costos en mantenimiento y mejorara el funcionamiento de los equipos.

El desarrollo de una metodología de calibración específica para el equipo PQ-UAQ, cuyas versiones anteriores han sido usadas sin calibración, es necesario para que esta metodología pueda ser adaptada a las necesidades de este equipo al tener en cuenta su aplicación.

2. Fundamentación teórica

2.1 Calidad de la energía

La cantidad de usuarios de la clasificación de eventos de calidad de energía ha crecido desde algunos ingenieros de campo en los 70's hasta miles de personas en los 2000's dedicadas a servicios de potencia, empresas consultoras de calidad de energía y agencias gubernamentales (Flores 2002).

En la actualidad las técnicas más usadas para la detección de eventos de calidad de energía son capaces de clasificar dichos eventos automáticamente tras haber separado las señales que estos generan de la señal producida comúnmente por la red eléctrica, la técnica más conocida para el análisis en frecuencia es la transformada de Fourier, sin embargo, esta solo funciona adecuadamente en el caso en el que el tiempo en una señal estacionaria sea infinito y es incapaz de resolver la información temporal relacionada a fluctuaciones, para resolver esto se usa la transformada de Fourier en tiempo corto que divide la señal en segmentos pequeños, que se pueden asumir como estacionarios, esto funciona bien mientras los intervalos sean pequeños comparados a la tasa de fluctuación, tasas de fluctuación elevadas puede significar errores significativos (Granados-Lieberman et al, 2011). Diversos sistemas expertos han sido propuestos para identificar y clasificar un número limitado de estos eventos siendo Wavelets y los filtros Kalman las opciones más comunes para la extracción de datos de las señales (Flores 2002).

Existen varios estándares de monitoreo y medición de calidad de la energía. A continuación se presentan los dos estándares oficiales más recurrentes en el ámbito de calidad de la energía.

2.1.1 EN 50160

La norma EN 50160 es la norma encargada de regular la calidad de energía en Europa, publicada en 1999 por el Comité Europeo por la Estandarización Electrotécnica, CENELEC, (en francés Comité Européen de Normalisation

Electrotechnique) esta norma establece que la tensión nominal eficaz entre fases no supere los 1000 Volts y que el valor eficaz nominal está comprendido entre 1000 Volts y 35000 Volts (Markiewicz & Klanj 2004).

2.1.2 IEEE 1159

Este estándar propuesto por el Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, IEEE, es una práctica recomendada para el monitoreo de características eléctricas de sistemas de energía de una fase y poli-fase. Incluye descripciones consistentes de fenómenos conducidos y variaciones que ocurren en un sistema de energía. Esta práctica describe condiciones y variaciones nominales que pueden ser originadas dentro de la fuente o carga del equipo, o de interacciones entre la fuente y la carga. Esta norma discute dispositivos de monitoreo y técnicas de interpretación de resultado de monitoreo (Dabbs and Sabin 2004).

2.2 Convertidor de Analógico a Digital y de Digital a Analógico

Los convertidores de analógico a digital traducen cantidades analógicas, propias de la mayor parte de los fenómenos en el mundo, a lenguaje digital para poder ser utilizados en computación, los convertidores de digital a analógico por el otro lado se utilizan para regresar datos a valores analógicos que pueden luego ser usados para control, despliegue de información o para procesos adicionales.

Las entradas análogas des cualquier origen comúnmente son traducidas a voltajes o corrientes que pueden aparecer como lecturas directas continuas en el tiempo o como ondas moduladas de corriente alterna (Kester et al, 1973).

2.3 FPGA

Los FPGAs (Field Programmable Gate Array, arreglo de compuertas programable en campo) son dispositivos que cuenta con miles de transistores organizados en bloques de lógica capaces de interconectarse de formas definidas por el usuario para realizar una variedad de funciones. Una ventaja principal al usar FPGA es que cambios de diseño no implican cambio del hardware externo.

Las interfaces de entrada y salida I/O son los medios por los que los datos se mandan desde señales lógicas internas a fuentes externas, y donde los datos son recibidos de fuentes externas. Las señales pueden ser unidireccionales o bidireccionales, de una salida o diferenciales y pueden seguir uno de los estándares de I/O, el propósito principal de las interfaces de entrada y salida es el de transmitir y recibir datos; sin embargo la porción designada a una entrada/salida puede contener fuentes adicionales, como traductores de voltaje, registros, impedancias y buffers.

Los bloques de lógica internos de los FPGA se organizan por medio de leguajes de descripción de hardware que son lenguajes de programación especializados para definir circuitos electrónicos digitales siendo los más comunes VHDL, Verilog y ABEL HDL.

El lenguaje VHDL (Very-high-speed Hardware Description Language) fue desarrollado por el departamento de defensa de los Estado Unidos de América y luego fue adoptado como estándar por la IEEE que fue lanzado como VHDL-87 en 1987, desde entonces la IEE ha actualizado el lenguaje a VHDL-93, VHDL-2000, VHDL-2002 y VHDL-2008 (Smith 2010).

2.3.1 Arquitectura de FPGAs

La estructura actual de los FPGAs es similar a los arreglos de compuertas de los ahora obsoletos ASICs (Application Specific Integrated Circuit, circuito integrado para aplicaciones específicas) que quedaron obsoletos por los mismos FPGAs.

Cada fabricante de FPGA usa su propia arquitectura en sus FPGAs sin embargo todos comparten las mismas bases que son los bloques de lógica configurables, bloques de entrada y salida configurables e interconexiones programables, también es común encontrar relojes internos, ALUs (Arithmetic Logic Unit, unidad aritmética lógica), decodificadores y memorias.

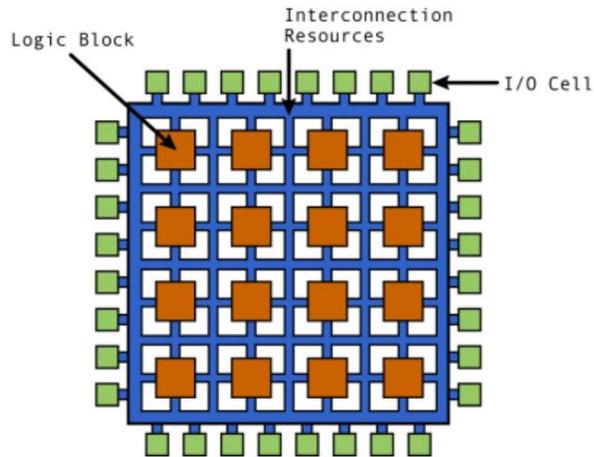


Figura 2-1 Arquitectura genérica de un FPGA (Zeidman Bob 2006)

2.3.1.1 Bloques de lógica configurable

Los bloques de lógica configurable en los FPGA además de contener toda la lógica disponible en el dispositivo contienen también LUTs (Lookup Tables), que usan para crear funciones lógicas arbitrarias, Flip-flops para elementos de almacenamiento dependientes del reloj y multiplexores para dirigir la lógica dentro del bloque así como hacia y desde fuentes externas a este.

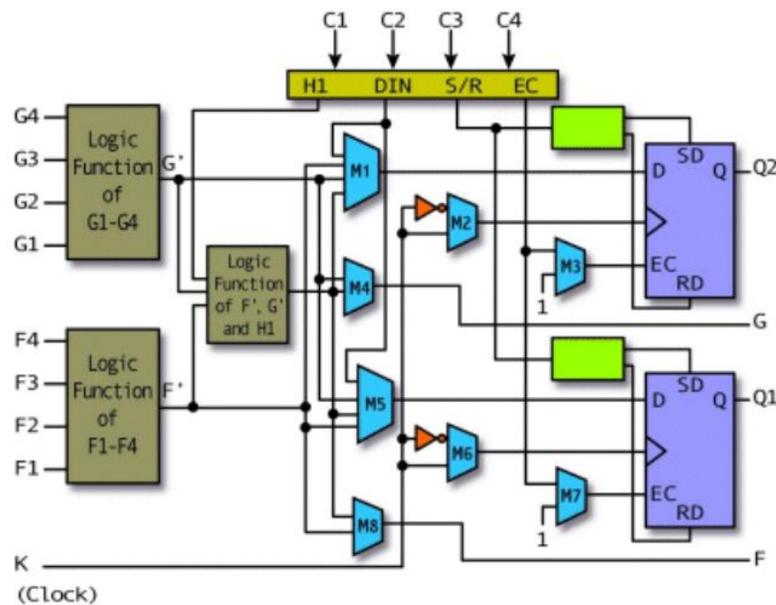


Figura 2-2 Bloque de lógica configurable de un FPGA (Zeidman Bob 2006)

2.3.1.2 Bloques de entrada y salida configurables

Los bloques de entrada y salida configurables se usan para enviar y recibir señales, consisten de un buffer de entrada y un buffer de salida de tres estados (0, 1 y alta impedancia), es común encontrar resistencias pull-up en las salidas, también es frecuente encontrar flip-flops en las salidas para que las señales dependientes del reloj puedan ser enviadas directamente a los pines sin mayor retraso.

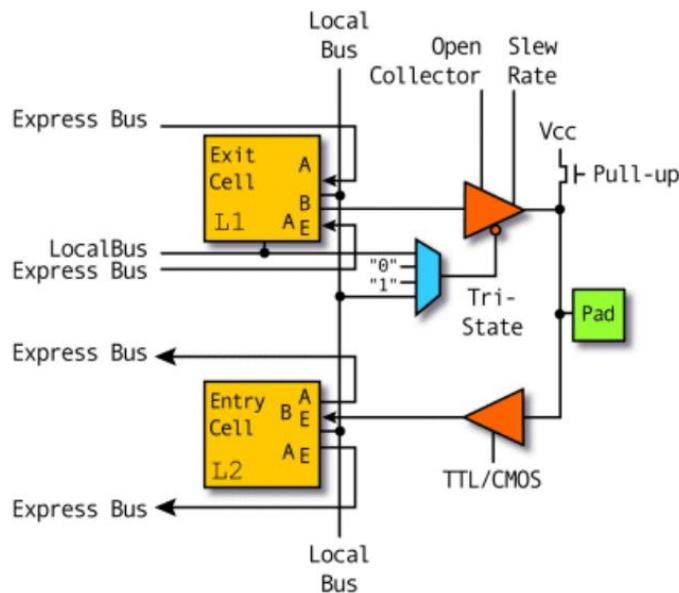


Figura 2-3 Bloque de entrada y salida configurable (Zeidman Bob 2006)

2.3.1.3 Interconexiones programables

Las interconexiones en un FPGA se caracterizan por ser reconfigurables por el usuario, se usan transistores para encender y apagar las conexiones entre los bloques de lógica configurable, matrices de interruptores programables también son usadas típicamente para este propósito, se usan buffers de tres estados para conectar múltiples bloques de lógica configurable a una sola línea larga que se conecta a elementos del FPGA que se encuentran físicamente lejos creando un bus, también se encuentran líneas especialmente largas diseñadas para tener una baja impedancia y tiempos de propagación rápidos llamadas líneas de reloj globales que como su nombre indica son usadas para distribuir las señales de reloj a través del dispositivo.

2.4 Calibración

El vocabulario internacional de metrología (VIM) define calibración como “Operación que bajo condiciones especificadas establece, en una primera etapa, una relación entre los valores y sus incertidumbres de medida asociadas obtenidas a partir de los patrones de medida, y las correspondientes indicaciones con sus incertidumbres asociadas y, en una segunda etapa, utiliza esta información para establecer una relación que permita obtener un resultado de medida a partir de una indicación.” Esto nos dice que la calibración sucede en dos pasos, en el primero se busca una relación entre las lecturas realizadas por el equipo a calibrar, a las que el VIM se refiere como indicaciones, y el patrón de medida que es un valor considerado como verdadero, este patrón de medida debe ser obtenido siempre por instrumentos de mayor jerarquía metrológica al instrumento del que se obtienen las indicaciones. Ya con esta relación el segundo paso es usarla para obtener coeficientes que puedan ser aplicados índices posteriores y así obtener valores más cercanos a los considerados verdaderos, al mismo tiempo establecer mejor la trazabilidad del instrumento en el que se llevó a cabo la calibración (JCGM 2012).

Las mediciones pueden tener varios tipos de errores de medición relacionados con el aparato al que pertenecen en el lazo de medición y se puede clasificar como errores sistemáticos, errores de instalación y errores azarosos. Los errores sistemáticos son generados por desviaciones en las ganancias, el offset y la linealidad de los instrumentos, estos errores pueden deberse a la construcción misma de los instrumentos, la metodología de medición o al desgaste de los instrumentos. Los errores de instalación se deben a uso incorrecto de los equipos de medición los más comunes son los signos invertidos. Los errores azarosos son causados por el grado de precisión de los instrumentos de medición (Moreno et al, 1999).

2.4.1 Calibración Estadística

La calibración estadística permite corregir errores de medición al modificar las características de escalado, esta se lleva a cabo en el centro de control por lo

que es capaz de calibrar el lazo de medición completo simultáneamente. La calibración estadística se realiza comparando un arreglo de valores medidos con los valores esperados que pueden ser obtenidos por un estimador o simplemente ser valores ya conocidos esto se representa de la siguiente forma.

$$r = Z_m - Z_e$$

Donde: r es el vector residuo.

Z_m Es el vector de valores medidos.

Z_e Es el vector de valores esperados.

De este vector r se pueden obtener la desviación estándar y el promedio del error, para corregir este error son necesarios los coeficientes de regresión lineal que pueden ser obtenidos de los pares de Z_m y Z_e (Moreno et al, 1999).

2.4.2 Error de Offset

El error de offset indica la desviación entre una indicación y un valor de referencia conocido en un solo punto.

En convertidores de analógico a digital o de digital analógico este error se refiere a la diferencia de la el nivel más bajo en el que ocurre una transición y el nivel ideal para esta transición, este nivel ideal se encuentra a la mitad del valor representado por el bit menos significativo del convertidor como muestra de forma gráfica la Figura 2-4(Maxim 2002).

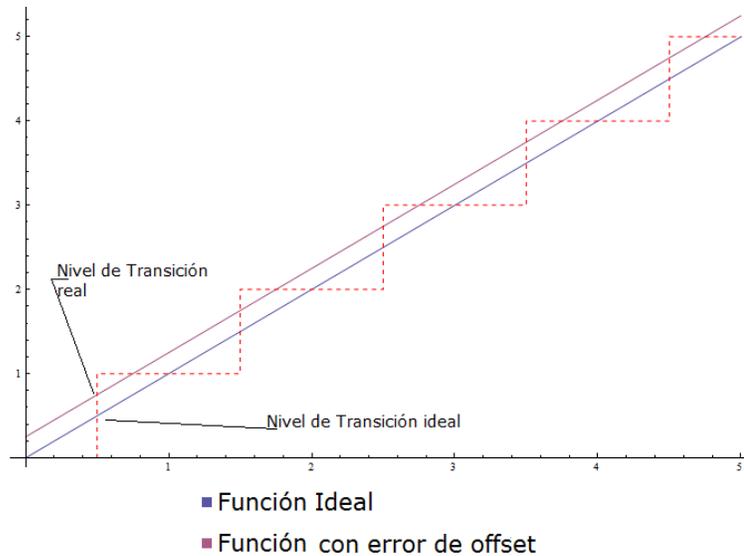


Figura 2-4 Error de Offset

El error de offset se puede definir matemáticamente con la Ecuación 2.1 (Hoeschele 1994).

$$V_{off} = V_{real} - V_{ideal}$$

Ecuación 2.1

Donde:

V_{off} = Voltaje de offset

V_{real} = Voltaje del nivel de transición

V_{ideal} = Voltaje ideal para la transición (la mitad del bit menos significativo)

2.4.3 Error de Ganancia

El error de ganancia de un convertidor se refiere a que tan bien la pendiente de la función de transferencia obtenida refleja la pendiente de la función de transferencia ideal, podemos apreciar esto visualmente en la (Maxim 2002).

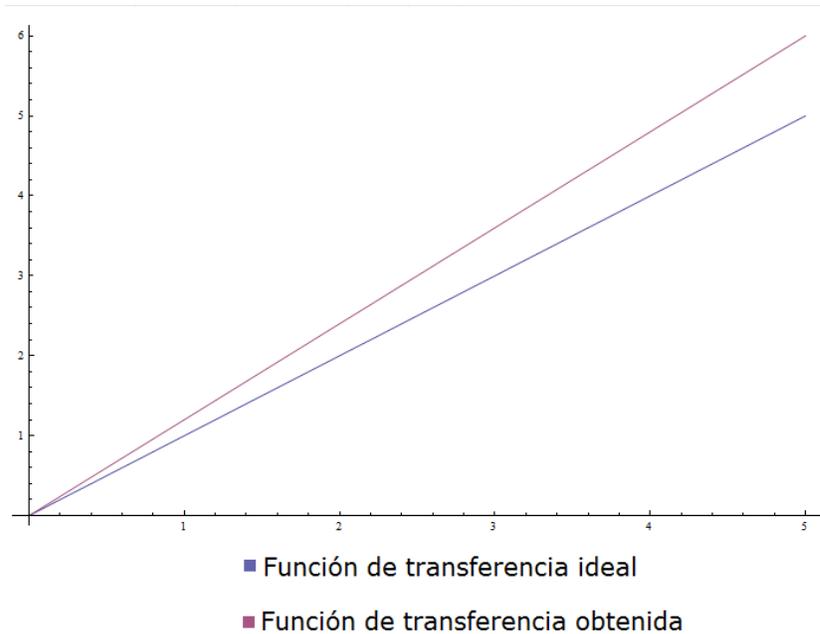


Figura 2-5 Error de Ganancia

Es posible determinar el error de ganancia comparando la función de transferencia del convertidor con la ideal, existen dos métodos para determinar la función de transferencia real de cualquier convertidor, el método del punto final y el método de la línea que mejor se ajusta (Chakravarty and Jain 2014).

En el método del punto final se considera la función de transferencia como la recta entre el primer punto de transición del convertidor y el último, sea el primer punto de transición $P(x_1, y_1)$ y el último punto de transición $Q(x_2, y_2)$ podemos encontrar la función de la recta definiendo otro punto $R(x, y)$ que sea parte de la recta y usando la Ecuación 2.2 (Lehmann 1989).

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1)$$

Ecuación 2.2

El método de la línea que mejor se ajusta, o línea de mínimos cuadrados, consiste en encontrar la curva que mejor se ajuste a un grupo dado de puntos, esto se logra minimizando la suma de los cuadrados del offset de los puntos con la curva, la pendiente de esta curva se puede encontrar con la Ecuación 2.3 (Weiss 2011).

$$m = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sum(x - \bar{x})^2}$$

Ecuación 2.3

Donde:

x = El conjunto de valores ideales

\bar{x} = Promedio de los valores de x

y = El conjunto de valores obtenidos

\bar{y} = Promedio de los valores de y

2.5 Confiabilidad

En estadística la confiabilidad se refiere a la habilidad de un instrumento de medición de producir resultados consistentes al aplicarse en objetos o fenómenos similares. Teóricamente esto se define como la relación de la varianza de los valores medidos con la varianza de los valores definidos como verdaderos. Actualmente existe discusión sobre la manera de calcular la confiabilidad, la más comúnmente usada en la literatura se base en el índice de asociación de los valores, este se puede calcular con los métodos de coeficiente de correlación momento-producto de Pearson, el coeficiente de correlación de Spearman y el coeficiente de correlación múltiple. Algunos autores consideran el índice de concordancia como la manera adecuada de calcular la confiabilidad, este índice es calculado comúnmente con el coeficiente de correlación intraclase para datos continuos y con el coeficiente Kappa para datos categóricos. La diferencia entre la asociación y la concordancia es que la asociación mide la dependencia lineal mientras la concordancia mide la coincidencia absoluta entre los conjuntos de valores como se muestra en la Tabla 2.1 Bartko (1991).

	Muestra 1: R1 = R2		Muestra 2: R1 + 4 = R2		Muestra 3: R1 x 2 = R2	
	R1	R2	R1	R2	R1	R2
	1	1	1	5	1	2
	2	2	2	6	2	4
	3	3	3	7	3	6
	4	4	4	8	4	8
Asociación	1		1		1	
Concordancia	1		-0.23		0.34	

Tabla 2.1

2.5.1 Coeficiente de Correlación Momento-Producto de Pearson

El coeficiente de correlación de Pearson es el método más utilizado en la literatura sin embargo este método ha sido calificado de inadecuado a favor de métodos que calculan el índice de asociación como la coeficiente de correlación intraclase.

El coeficiente de correlación de Pearson de dos listas de variables escalares A y B representa de forma numérica en el rango de -1 a +1 la dependencia lineal entre los dos conjuntos. Este coeficiente está definido con la Ecuación 2.4 Kutner (2005)

$$\rho(A, B) = \frac{1}{N - 1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{A_i - \mu_A}{\sigma_A} \right) \left(\frac{B_i - \mu_B}{\sigma_B} \right)$$

Ecuación 2.4

Donde:

N = Numero de escalares en cada lista

μ = media

$\sigma =$ Desviación estandar

Cuando se conoce la covarianza de A y B también es posible calcular el coeficiente de correlación de Pearson usando la Ecuación 2.5 Kutner (2005)

$$\rho(A, B) = \frac{cov(A, B)}{\sigma_A \sigma_B}$$

Ecuación 2.5

2.5.2 Coeficiente de correlación de Spearman

El Coeficiente de correlación de Spearman indica la asociación entre dos variables o grupos de variables, al igual que el coeficiente de correlación de Pearson sus valores oscilan entre -1 y +1. El coeficiente de correlación de Spearman se calcula con la Ecuación 2.6 Kutner (2005)

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum D^2}{N(N^2 - 1)}$$

Ecuación 2.6

Donde:

$D =$ Diferencia entre las variables correspondientes

$N =$ Numero de parejas de variables

2.5.3 Coeficiente de correlación intraclase

El coeficiente de correlación intraclase fue desarrollado a partir del coeficiente de correlación de Pearson específicamente para casos en los cuales no es necesario diferenciar los dos grupos de variables de los cuales se calculara la correlación. Al igual que el coeficiente de correlación de Pearson, el coeficiente de correlación intraclase entrega resultados en el rango de -1 a +1 pero a diferencia de la correlación de Pearson este método evalúa la concordancia. El coeficiente de correlación intraclase está definido por la Ecuación 2.7 Bartko (1966).

$$r = \frac{1}{N s^2} \sum \{(x - \bar{x})(x' - \bar{x})\}$$

Ecuación 2.7

Donde:

\bar{x} = *Media*

$$\bar{x} = \frac{1}{2N} \sum (x + x')$$

s^2 = *Desviación estándar*

$$s^2 = \frac{1}{2N} \left(\sum (x - x')^2 + \sum (x' - x)^2 \right)$$

2.5.4 Coeficiente kappa

El coeficiente kappa, al igual que el coeficiente de correlación intraclase, es un índice de concordancia sin embargo el coeficiente kappa fue desarrollado para casos en los que las variables a evaluar no son continuas, los posibles valores del coeficiente kappa oscilan entre 0 y 1. El coeficiente kappa está definido por la Ecuación 2.8 López et al. (2001).

$$K = \frac{\sum \pi_{ii} - \sum \pi_i \sum \pi_i}{1 - \sum \pi_i \pi_i}$$

Ecuación 2.8

3. Metodología

El desarrollo de este trabajo se presenta dividido en varios módulos o bloques para facilitar su descripción. En la Figura 3-1 se presentan los pasos principales a seguir para la calibración del equipo PQ-UAQ, la cual debe ser completada antes del cálculo de confiabilidad del equipo, las etapas representadas en cuadros blancos en esta figura utilizan hardware y software desarrollado previamente y las etapas representadas en cuadros azules fueron desarrolladas durante este trabajo.

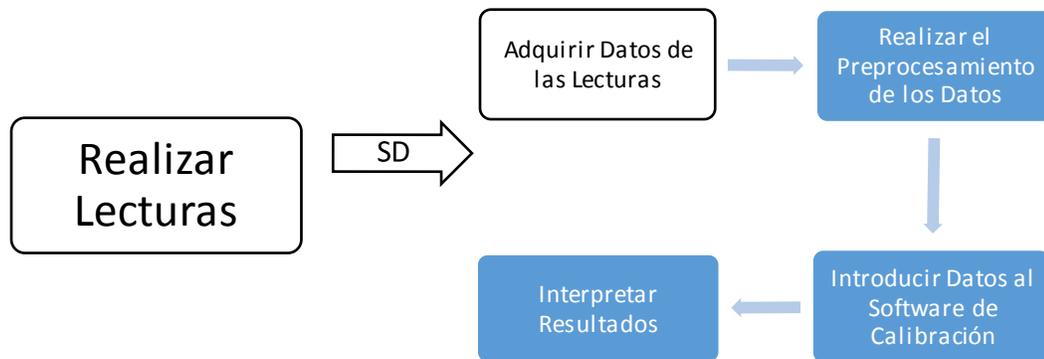


Figura 3-1 Diagrama general de bloques

El cálculo de la confiabilidad del equipo se realiza antes y después de la calibración con el propósito de comparar resultados e identificar el efecto de la calibración en la confiabilidad del equipo.

El desarrollo general a seguir para el cálculo de la confiabilidad del equipo PQ-UAQ requiere una serie de pasos presentados en la Figura 3-2.

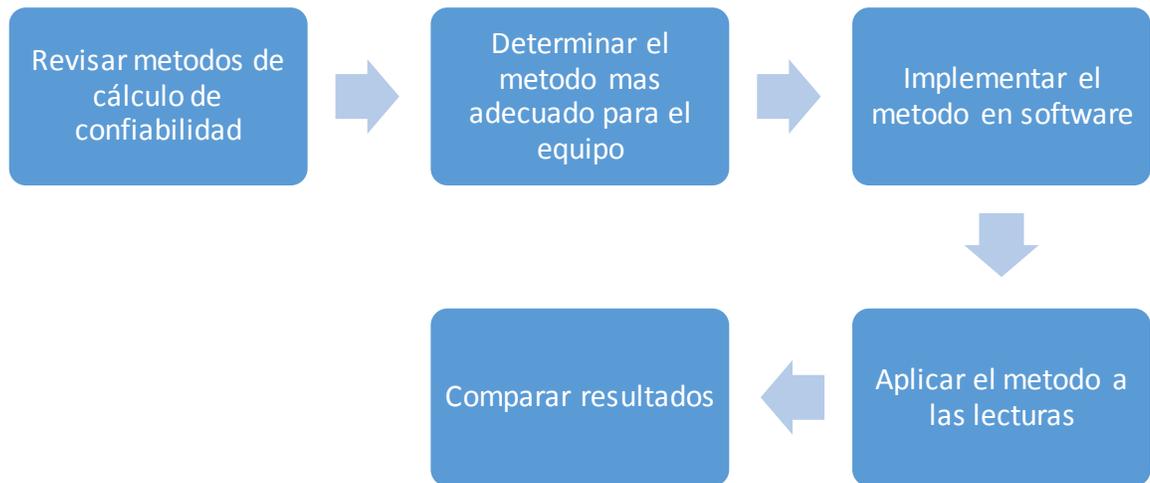


Figura 3-2 Desarrollo del cálculo de confiabilidad

3.1 Descripción del equipo PQ-UAQ

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede observar el equipo PQ-UAQ con sus entradas de corriente y tensión resaltadas así como su módulo Bluetooth. En la Tabla 3.1 se muestran las características del ADC del equipo PQ-UAQ, el ADS130E08 de la marca Texas Instruments.

Modulo Bluetooth

Entradas de tensión y corriente



Figura 3-3 Tarjeta PQ-UAQ

Característica de la Tarjeta

Canales de Tensión	4
Canales de Corriente	4
Resolución de los Canales de Tensión	16 bits
Resolución de los Canales de Corriente	16 bits
Frecuencia de Muestreo de los Canales de Corriente	8 KSa/s
Frecuencia de Muestreo de los Canales de Tensión	8 KSa/s
Error de Offset Listado	$\pm 350 \mu\text{V}$
Error de Ganancia Listado	$\pm 0.1\%$ de la escala completa

Tabla 3.1 Características del ADC

La tarjeta PQ-UAQ también cuenta con amplificadores de aislamiento modelo AMC12000 en cada uno de sus canales de tensión y corriente. El equipo recibe instrucciones por Bluetooth y guarda los datos de sus lecturas en una SD sin formato la cual es leída posteriormente por un software especializado que genera archivos .mat con los datos de las lecturas los cuales son usados para la calibración.

3.2 Calibración

3.2.1 Montaje de las pruebas

Las lecturas usadas para la calibración fueron tomadas de un circuito de corriente alterna trifásica que acciona un motor de 1HP sin carga a 220 V y frecuencia de 60Hz que se muestra en la Figura 3-4. Se tomaron 40 lecturas de este circuito para determinar el tamaño de muestra significativo para un nivel de confianza del 95% y un margen de error del 0.5%. Los tamaños de muestra representativos resultar ser menores a 40 por lo que no fue necesario tomar más lecturas y se prosiguió con las 40 que fueron tomadas en un principio.

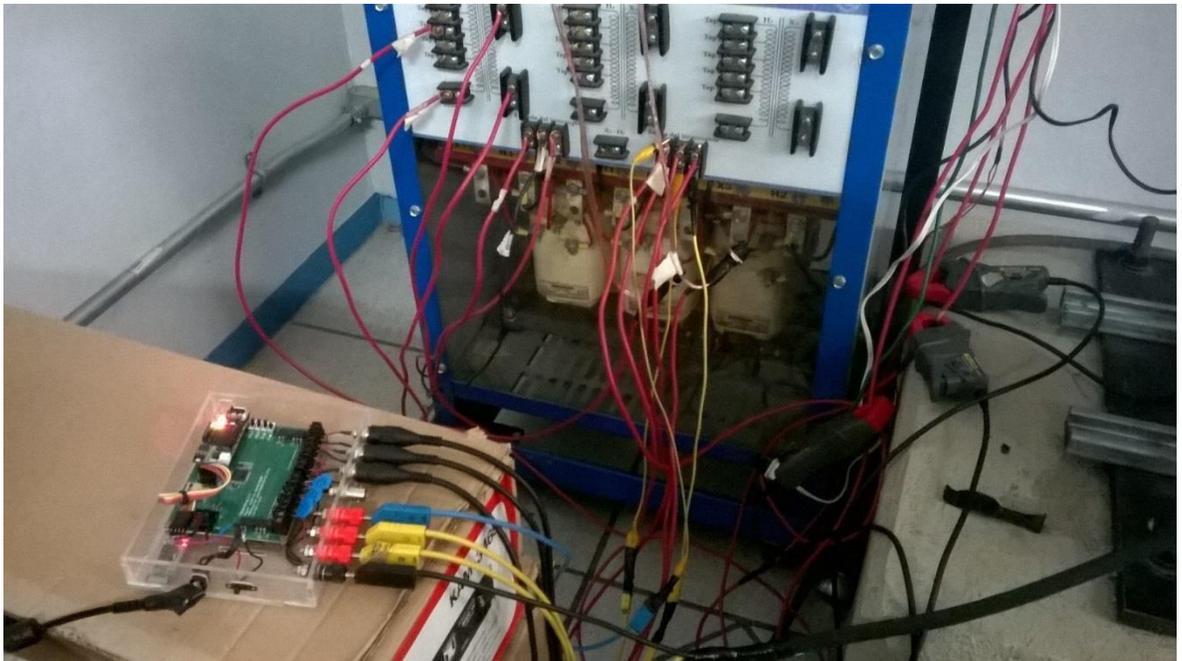


Figura 3-4 Instalación de la prueba

3.2.2 Preprocesamiento

La etapa de preprocesamiento en la calibración es necesaria para poder comparar las lecturas hechas por el equipo con las lecturas consideradas ideales obtenidas a través de un equipo de mayor jerarquía metrológica debido a que las frecuencias de muestro de los dispositivos son diferentes, la del PQ-UAQ es de 8 kilo muestras por segundo y las de la referencia de 4 kilo muestras por segundo. Además de la frecuencia de muestreo la duración de las lecturas de la referencia es de 5 segundos y los equipos no estaban sincronizados por lo que es necesario identificar los cruces por cero de ambas lecturas para poder emparejarlas. Este preprocesamiento es realizado por medio de un software descrito en la Figura 3-5.

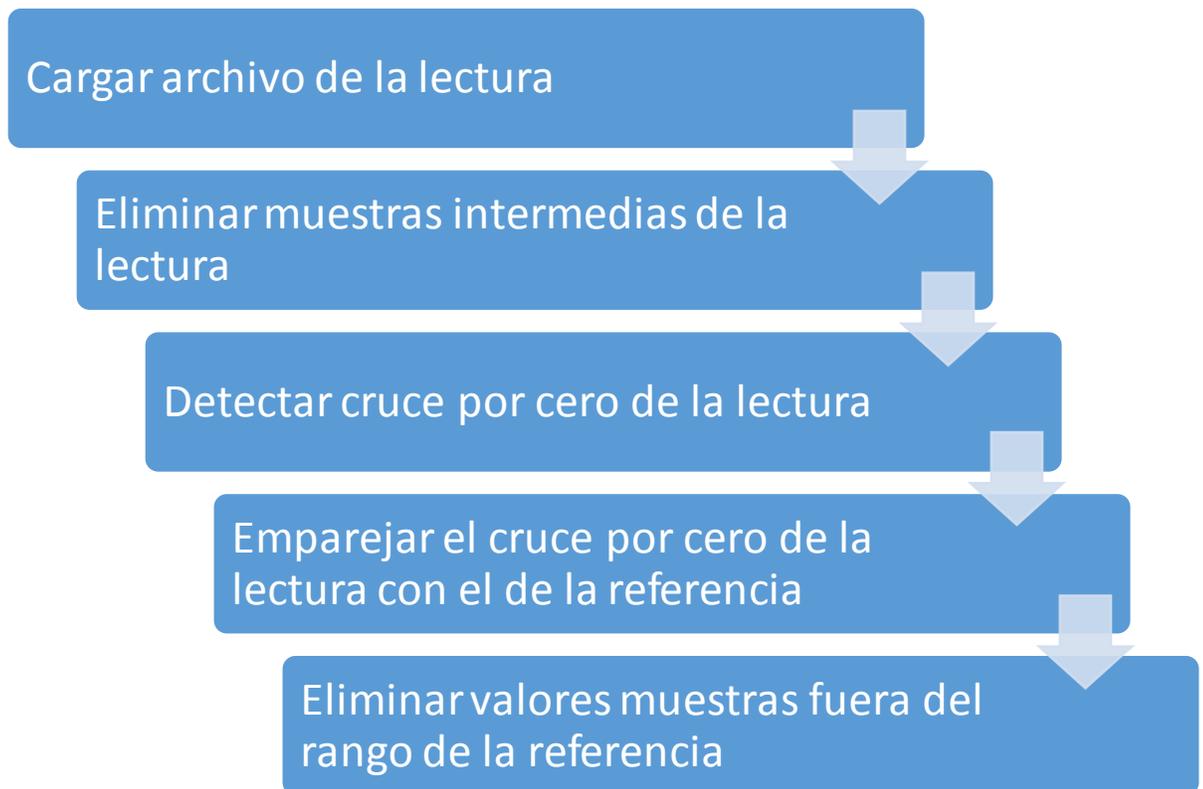


Figura 3-5 Preprocesamiento

3.2.3 Software de calibración

El software que realiza la calibración se desarrolló en C++ con las bibliotecas de Qt para la interfaz y la biblioteca MatIO para poder leer y modificar los archivos .mat que contienen las lecturas del equipo y las referencias. El

software cuenta con una interfaz gráfica simple que se muestra en la Figura 3-6 desde donde se puede explorar los archivos de la computadora para buscar y abrir los archivos .mat correspondientes a las lecturas, visualizar los datos contenidos en los archivos y realizar las operaciones de la calibración y el cálculo de la confianza.

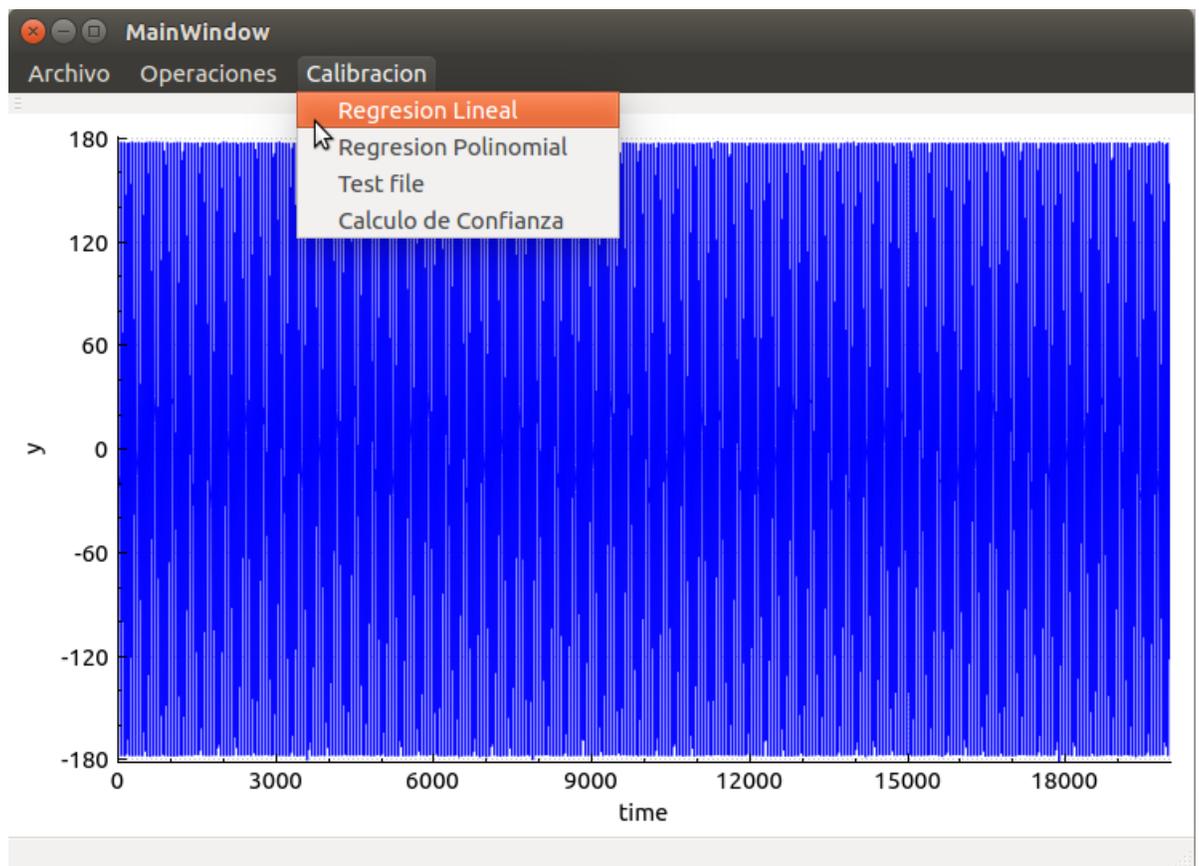


Figura 3-6 Interfaz gráfica

A través del software se aplicó la regresión lineal a los 240 archivos generados a partir de las 40 lecturas obteniendo 40 coeficientes de offset y 40 coeficientes de ganancia por cada canal los cuales fueron promediados para obtener los resultados finales de la calibración.

3.3 Cálculo de confiabilidad

El método de cálculo de confiabilidad más comúnmente encontrado en la literatura es la correlación producto-momento de Pearson, sin embargo este

método ha sido calificado como inadecuado con anterioridad por lo que es necesario documentarse, es decir conocer los conceptos, las razones por las que se califica de inadecuado y familiarizarse con el tema para poder estar seguros de que el método elegido es el más adecuado para la aplicación dada.

3.3.1 Implementación en software

Los métodos de coeficiente de correlación de Pearson y coeficiente de correlación intraclase fueron implementados en software y aplicados a los archivos de lecturas tanto previas como posteriores a la calibración.

4. Resultados

Los coeficientes de ganancia obtenidos de la calibración se muestran en Tabla 4.1 y los coeficientes de offset obtenidos se muestran en Tabla 4.2.

Ganancia	Canal A	Canal B	Canal C
Tensión	0.010361763	0.010513065	0.010481488
Corriente	0.007742593	0.008574292	0.008165267

Tabla 4.1 Coeficientes de ganancia

Offset	Canal A	Canal B	Canal C
Tensión	-0.38674085	-0.298389775	-0.047643316
Corriente	-0.263481625	-0.281328075	-0.137491475

Tabla 4.2 Coeficientes de offset

En la Figura 4-1 se muestra una comparación de las señales de referencia, las indicaciones entregadas por el equipo y la señal calibrada de los tres canales de tensión. La mejora se nota especialmente en el canal C cuyo error de offset era significativo.

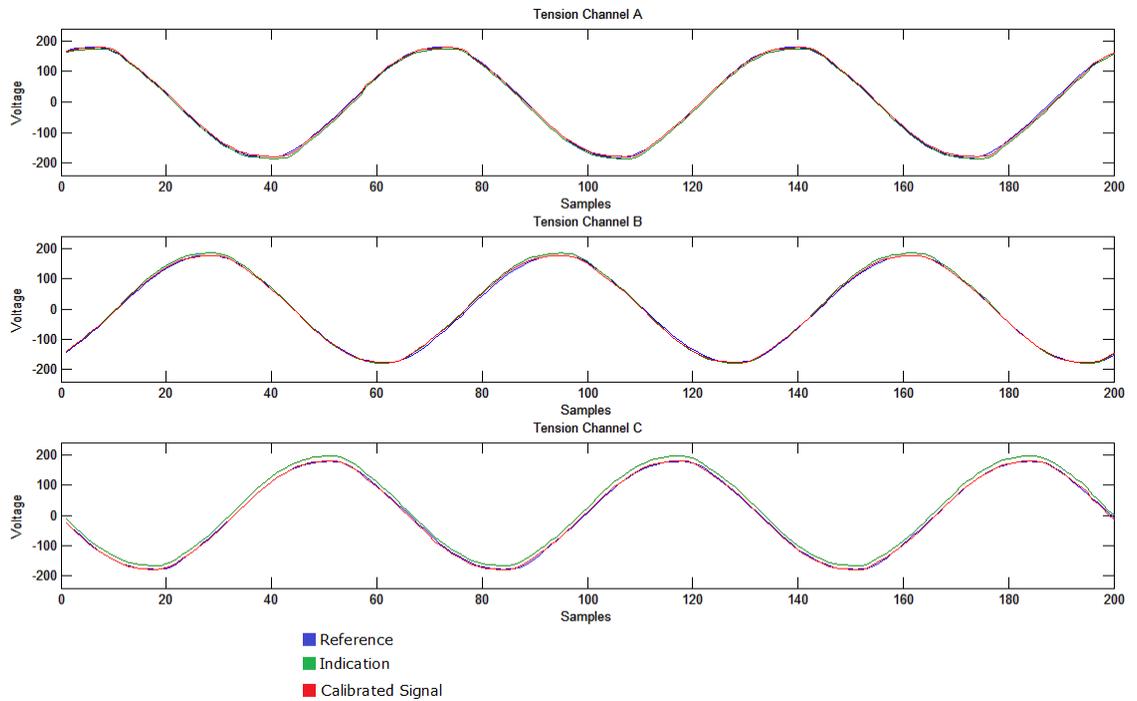


Figura 4-1 Gráficas de tensión

La Figura 4-2 muestra la comparación de la señal de referencia, las indicaciones dadas por el dispositivo y la señal calibrada en los tres canales de corriente. Los canales de corriente tenían error de ganancia considerable que logro ajustarse tras la calibración.

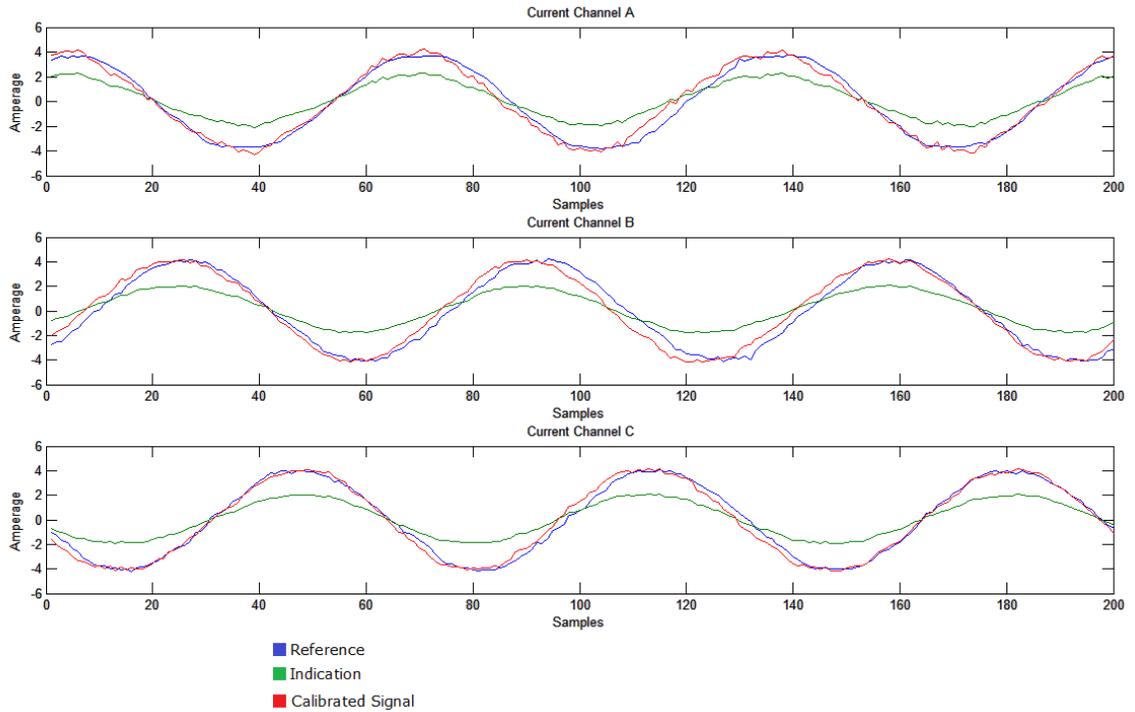


Figura 4-2 Graficas de corriente

Los porcentajes de error antes y después de la calibración de cada canal de tensión se muestran a continuación en la Tabla 4.3 y para cada canal de corriente en la Tabla 4.4.

Porcentaje de error	Canal de tensión A	Canal de tensión B	Canal de tensión C
Indicación	20.8147%	17.6054%	21.5460%
Calibrado	20.0185%	16.5547	17.8563%

Tabla 4.3 Porcentajes de error en canales de tensión

Porcentaje de error	Canal de corriente A	Canal de corriente B	Canal de corriente C
Indicación	50.2116%	54.9784%	52.7695%
Calibrado	15.6744%	11.7326%	16.3864%

Tabla 4.4 Porcentajes de error en canales de corriente

Los resultados del análisis de confiabilidad para los canales de tensión y corriente obtenidos a través del coeficiente de correlación de Pearson se muestran en la Tabla 4.5 y los coeficientes de los canales de corriente en la Tabla 4.6.

Coeficiente de confiabilidad	Canal de tensión A	Canal de tensión B	Canal de tensión C
Indicación	0.999102	0.999102	0.999115
Calibrado	0.999102	0.999102	0.999115

Tabla 4.5 Coeficientes de confiabilidad en canales de tensión

Coeficiente de confiabilidad	Canal de corriente A	Canal de corriente B	Canal de corriente C
Indicación	0.983502	0.985956	0.985792
Calibrado	0.983502	0.985956	0.985792

Tabla 4.6 Coeficientes de confiabilidad en canales de corriente

Los resultados del análisis de confiabilidad de los canales de tensión obtenidos a través del coeficiente de correlación intraclase se muestran en la Tabla 4.7 y los coeficientes de los canales de corriente se muestran en la Tabla 4.8.

Coeficiente de confiabilidad	Canal de tensión A	Canal de tensión B	Canal de tensión C
Indicación	0.999102	0.999115	0.999109
Calibrado	0.999102	0.999115	0.999109

Tabla 4.7 Coeficientes de confiabilidad en canales de tensión

Coeficiente de confiabilidad	Canal de corriente A	Canal de corriente B	Canal de corriente C
Indicación	0.983493	0.985945	0.985783
Calibrado	0.983493	0.985945	0.985783

Tabla 4.8 Coeficientes de confiabilidad en canales de corriente

5. Conclusiones

Los resultados muestran que la calibración logro una reducción del porcentaje de error en los canales de tensión de aproximadamente el 1% y en los canales de corriente se logró una reducción considerable del 30%.

Los coeficientes de confiabilidad obtenidos del análisis muestran que el equipo PQ-UAQ tiene una elevada confiabilidad, es decir, que los valores que entrega no varían mucho al aplicarse este en condiciones similares. Los resultados del análisis de confiabilidad también muestran que la calibración no tiene un efecto significativo en la confiabilidad del equipo ya que los coeficientes calculados no presentan mayo variación, así mismo los coeficientes de confiabilidad obtenidos por ambos métodos, el coeficiente de correlación de Pearson y el coeficiente de correlación intraclase, no presentan diferencias significativas posiblemente debido a la elevada confiabilidad del equipo.

- Adel, Hussein, Marc Sabut, Roger Petigny, and Marie-minerve Louerat. 2014. "Split ADC Digital Background Calibration for High Speed SHA-Less Pipeline ADCs," 1143–46.
- Bartko, J. J. 1991. "Measurement and Reliability: Statistical Thinking Considerations." *Schizophrenia Bulletin* 17 (3): 483–89. doi:10.1093/schbul/17.3.483.
- Bartko, J.J. 1966. "The Intraclass Correlation Coefficient As a Measure of Reliability." *Psychological Reports* 19 (1): 3–11. doi:10.2466/pr0.1966.19.1.3.
- Chakravarty, Abhijan, and Sambhav Jain. 2014. "Measure an ADC ' S Offset and Gain Error." *EDN Network*, 1–5.
- Chen, C. 2012. "A Calibration Test Platform of Power Quality Instruments for Grid Integration of Wind Energy System." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 60 (7): 1–1. doi:10.1109/TIE.2012.2216240.
- Chen, Degang, Zhongjun Yu, and Randy Geiger. 2005. "An Adaptive, Truly Background Calibration Method for High Speed Pipeline ADC Design." *Proceedings - IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 6190–93. doi:10.1109/ISCAS.2005.1466054.
- Dabbs, W.W., and D.O. Sabin. 2004. "Representation of IEEE Std 1159.3-2002 PQDIF in Extensible Markup Language (XML)." *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004.*, no. Xml: 1–6. doi:10.1109/PES.2004.1372852.
- De Venuto, Daniela, and Leonardo Reyneri. 2007. "Fully Digital Strategy for Fast Calibration and Test of???? ADCs." *Microelectronics Journal* 38: 474–81. doi:10.1016/j.mejo.2006.08.005.
- Ferrero, Alessandro, Massimo Lazzaroni, and Simona Salicone. 2002. "A Calibration Procedure for a Digital Instrument for Electric Power Quality Measurement." *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 51 (4): 716–22.

doi:10.1109/TIM.2002.803293.

Flores, R.a. 2002. "State of the Art in the Classification of Power Quality Events, an Overview." *10th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Proceedings (Cat. No.02EX630)* 1: 1–4. doi:10.1109/ICHQP.2002.1221398.

Gatti, U, G Gazzoli, F Maloberti, and S Mazzoleni. 1999. "168 a Calibration Technique for High-Speed High-Resolution." *Processing*, no. 466: 27–28.

Granados-Lieberman, D., R. a. Osornio-Rios, J. R. Rivera-Guillen, M. Trejo-Hernandez, and R. J. Romero-Troncoso. 2013. "Torque Reduction and Workpiece Finishing Effects due to Voltage Sags in Turning Processes." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 228 (1): 140–48. doi:10.1177/0954405413497940.

Granados-Lieberman, D., R.J. Romero-Troncoso, R.a. Osornio-Rios, a. Garcia-Perez, and E. Cabal-Yeppez. 2011. "Techniques and Methodologies for Power Quality Analysis and Disturbances Classification in Power Systems: A Review." *IET Generation, Transmission & Distribution* 5 (July 2010): 519. doi:10.1049/iet-gtd.2010.0466.

Granados-Lieberman, David, Martin Valtierra-Rodriguez, Luis Morales-Hernandez, Rene Romero-Troncoso, and Roque Osornio-Rios. 2013. "A Hilbert Transform-Based Smart Sensor for Detection, Classification, and Quantification of Power Quality Disturbances." *Sensors* 13: 5507–27. doi:10.3390/s130505507.

Hao, Lingling, Lusheng Ge, Zhongjuan Wang, Zhijie Chen, and Lin Shu. 2009. "Research on Multi-Function Power Quality Calibration System." *2009 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2009*, 3298–3302. doi:10.1109/ICIEA.2009.5138813.

Henryk Markiewicz, Antoni Klanj. 2004. "Perturbaciones de Tensión." *Leonardo Power Quality Initiative*.

Hoeschele, David F. 1994. "Analog-to-Digital and Digital-to-Analog Conversion

Techniques.”

Huang, Jiun Lang, Xuan Lun Huang, and Ping Ying Kang. 2009. “A Self-Testing Assisted Pipelined-ADC Calibration Technique.” *ASICON 2009 - Proceedings 2009 8th IEEE International Conference on ASIC*, no. 1: 565–68. doi:10.1109/ASICON.2009.5351348.

Jalili, Armin, Sayed Masoud Sayedi, J. Jacob Wikner, and Abolghasem Zeidaabadi Nezhad. 2011. “A Nonlinearity Error Calibration Technique for Pipelined ADCs.” *Integration, the VLSI Journal* 44 (3). Elsevier: 229–41. doi:10.1016/j.vlsi.2011.01.004.

JCGM. 2012. “Vocabulario Internacional de Metrología - Conceptos Fundamentales Y Generales, Y Términos Asociados (VIM)” 3ª Edición: 1–89. <http://www.cem.es/sites/default/files/vim-cem-2012web.pdf>.

Kester, Walt, Dan Sheingold, and James Bryandt. 1973. “Fundamentals Of Sampled Data Systems.” *Fundamentals Of Sampled Data Systems* 21 (5): 411–15. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20490247>.

Kutner, Michael H. 2005. *Applied Linear Statistical Models*. http://books.google.fr/books?id=0xqCAAACAAJ&dq=intitle:Applied+linear+statistical+models+djvu&hl=&cd=1&source=gbs_api.

Lehmann, Charles H. 1989. “Geometria Analitica.” *Editorial Noriega*.

López, Autores, De Ullibarri Galparsoro, and Pita Fernández. 2001. “Medidas de Concordancia : El Índice de Kappa.” *Cad Aten Primaria*, 2–6.

Maxim. 2002. “ADC and DAC Glossary.” doi:10.1016/j.measurement.2006.12.007.

McNeill, John a., Ka Yan Chan, Michael C. W. Coln, Christopher L. David, and Cody Brenneman. 2011. “All-Digital Background Calibration of a Successive Approximation ADC Using the ‘Split ADC’ Architecture.” *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers* 58 (10): 2355–65. doi:10.1109/TCSI.2011.2123590.

- Moreno, J.G., J.L.M. Vigil-Escalera, and R.S. Alvarez. 1999. "Statistical Measurement Calibration Based on State Estimator Results." *1999 IEEE Transmission and Distribution Conference (Cat. No. 99CH36333)* 1: 184–89. doi:10.1109/TDC.1999.755337.
- Nuzzo, P., F. De Bernardinis, P. Terreni, and G. Van Der Plas. 2006. "Efficient Calibration through Statistical Behavioral Modeling of a High-Speed Low-Power ADC." *2006 Ph.D. Research in Microelectronics and Electronics*, 297–300. doi:10.1109/RME.2006.1689955.
- Provost, Benoit, and Edgar Sánchez-Sinencio. 2004. "A Practical Self-Calibration Scheme Implementation for Pipeline ADC." *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 53 (2): 448–56. doi:10.1109/TIM.2004.823317.
- Ramos, Pedro M, Nuno B Brás, and a Cruz Serra. 2006. "A New Calibration Method for Current and Voltage Sensors Used in Power Quality Measurements." *Current*, no. April: 2283–88.
- Romero-Troncoso, Rene J., Eduardo Cabal-Yepez, Arturo Garcia-Perez, Roque a. Osornio-Rios, Ricardo Alvarez-Salas, and David Granados-Lieberman. 2011. "Reconfigurable Instrument for Power Quality Monitoring in 3-Phase Power Systems." *SDEMPED 2011 - 8th IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives*, 186–91. doi:10.1109/DEMPED.2011.6063622.
- Roy, Sounak, Hiranmoy Basak, and Swapna Banerjee. 2013. "Foreground Calibration Technique of a Pipeline ADC Using Capacitor Ratio of Multiplying Digital-to-Analog Converter (MDAC)." *Microelectronics Journal* 44 (12). Elsevier: 1336–47. doi:10.1016/j.mejo.2013.09.004.
- Smith, Gina R. 2010. "FPGAs 101." *Elsevier*, 101.
- Suárez-revelo, Jazmín Ximena, John Fredy, Jon Duque-grajales, and Alejandro Montoya-betancur. 2015. "Test – Retest Reliability in Electroencephalographic

Recordings,” 1–5.

Tavassoli, B., and O. Shoaie. 2006. “Digital Background Calibration of Pipeline ADC with Open-Loop Gain Stage.” *2006 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 5255–58. doi:10.1109/ISCAS.2006.1693818.

Tsang, Cheongyuen, Yun Chiu, Johan Vanderhaegen, Sebastian Hoyos, Charles Chen, Robert Brodersen, and Borivoje Nikolic. 2008. “Background ADC Calibration in Digital Domain.” *Proceedings of the Custom Integrated Circuits Conference*, no. Cicc: 301–4. doi:10.1109/CICC.2008.4672081.

Valtierra-Rodriguez, Martin, Roque Alfredo Osornio-Rios, Arturo Garcia-Perez, and Rene De Jesus Romero-Troncoso. 2013. “FPGA-Based Neural Network Harmonic Estimation for Continuous Monitoring of the Power Line in Industrial Applications.” *Electric Power Systems Research* 98. Elsevier B.V.: 51–57. doi:10.1016/j.epsr.2013.01.011.

Vito, L. De, L. Michaeli, and S. Rapuano. 2008. “An Improved ADC-Error-Correction Scheme Based on a Bayesian Approach.” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 57 (1): 128–33. doi:10.1109/TIM.2007.908621.

Weiss, Neil A. 2011. *Introductory Statistics. Statistics.*

Xiang, Chen, Li Qiang, Yang Ji-hai, and Wang Kong-qiao. 2008. “Test-Retest Repeatability of Surface Electromyography Measurement for Hand Gesture,” 1923–26.

Yin, Yong Sheng, Rui Zhang, Jun Yang, and Ming Lun Gao. 2011. “Calibration Method Considering Second-Order Error Term of Timing Skew for a Novel Multi-Channel ADC.” *Proceedings of International Conference on ASIC*, no. 2: 949–52. doi:10.1109/ASICON.2011.6157363.

Yuan, Jie, Sheung Wai Fung, Kai Yin Chan, and Ruoyu Xu. 2012. “An Interpolation-Based Calibration Architecture for Pipeline ADC with Nonlinear Error.” *IEEE*

Transactions on Instrumentation and Measurement 61 (1): 17–25.
doi:10.1109/TIM.2011.2161026.

Zeidman Bob. 2006. “All about FPGAs.” *EE Times*, no. 2.

Zijdenbos, Alex P, and T Benoit. 1993. “Measurement Reliability and Reproducibility in Manual and Semi-Automat lc MRI Segment at Ion.” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 162–63.

6. Anexo Códigos

```
#ifndef MAINWINDOW_H
#define MAINWINDOW_H

#include <QMainWindow>
#include "open.h"
#include "matio.h"
namespace Ui {
class MainWindow;
}

class MainWindow : public QMainWindow
{
    Q_OBJECT

public:
    explicit MainWindow(QWidget *parent = 0);
    ~MainWindow();

public slots:
    void openslot (QString path);

private slots:
    void on_actionAbrir_Referencia_triggered();

    void on_actionAbrir_Medicion_triggered();

    void on_actionGraficar_triggered();

    void on_actionTest_file_triggered();

    void on_actionRegresion_Lineal_triggered();

    void on_actionCalculo_de_Confianza_triggered();

private:
    Ui::MainWindow *ui;
    Open abr;
    QVector <double> ref;
    QVector <double> med;
    QVector <double> res;
    QVector <double> time;
    double min;
    double max;
    mat_t *matfp;
    matvar_t *matvar;
    bool RoM;////False=referencia//True=Medicion por el equipo
};

#endif // MAINWINDOW_H
```

```

#ifndef OPEN_H
#define OPEN_H

#include <QDialog>
#include <QtCore>
#include <QtGui>
#include <QFileSystemModel>

namespace Ui {
class Open;
}

class Open : public QDialog
{
    Q_OBJECT

public:
    explicit Open(QWidget *parent = 0);
    ~Open();

private slots:
    void on_treeView_clicked(const QModelIndex &index);

    void on_listView_doubleClicked(const QModelIndex &index);

signals:
    void sigpath(QString path);

private:
    Ui::Open *ui;
    QFileSystemModel *dirmodel;
    QFileSystemModel *filemodel;
    QString path;

};

#endif // OPEN_H

#include "mainwindow.h"

#include "ui_mainwindow.h"
#include "matio.h"

MainWindow::MainWindow(QWidget *parent) :
    QMainWindow(parent),
    ui(new Ui::MainWindow)
{
    ui->setupUi(this);
    connect(&abr, SIGNAL(sigpath(QString)), this, SLOT(openslot(QString)));

    min=0;
    max=0;
    setCentralWidget(ui->Plot);
}

```

```

    ui->Plot->addGraph();
    ui->Plot->addGraph();
    ui->Plot->addGraph();
    ui->Plot->graph(0)->setPen(QPen(Qt::blue));
    ui->Plot->graph(1)->setPen(QPen(Qt::green));
    ui->Plot->graph(2)->setPen(QPen(Qt::red));
}

MainWindow::~MainWindow()
{
    Mat_VarFree(matvar);
    Mat_Close(matfp);
    delete ui;
}

void MainWindow::openslot(QString path){
    //const char* Cpath = path.toStdString().c_str();

    int start[2]={0,0},edge[2]={1,1},stride[2]={1,1},err;
    //start, el sector de inicio de lectura en el mat {0,0} si quiere
    leer desde el inicio
    //stride este es para estructura de matlab, no las usamos {1,1} para
    valores reales
    //edge es el vector de lectura, nosotros usamos una "matriz" de 1 x
    "numero de datos".

    matfp = Mat_Open(path.toStdString().c_str(),MAT_ACC_RDONLY);
    if(NULL!=matfp)
    {
        qDebug()<<"Archivo Abierto!!";
    }
    else
    {
        qDebug()<<"NO se pudo abrir!!";
        return;
    }

    matvar=Mat_VarReadInfo(matfp,"Data");
    if(matvar == NULL){
        qDebug()<<"NO se pudo abrir la variable";
        return;
    }

    if(matfp == NULL){
        qDebug() << "Error al arbrir "<< path << "\n";
    }
    else{
        if(RoM){
            ////guardar a medicion
            mat_int16_t *predestino = new mat_int16_t[matvar->dims[1]];
            //aquí se genera un apartado de memoria para guardar lo leido
            //double_t *predestino = new double_t[matvar->dims[1]];

            edge[0]=matvar->dims[0];
            edge[1]=matvar->dims[1];

```

```

err =
Mat_VarReadData(matfp,matvar,predestino,start,stride,edge);
    if(err != 0)
    {
        qDebug() << "error de lectura de variable";
    }

med.clear();

for(int i=0; i< edge[1]-1; i++){

    med.push_back(predestino[i]);
    //qDebug() << med[i] << "\n";

    if(med[i]>max){
        max=med[i];
    }
    if(med[i]<min){
        min=med[i];
    }
}

std::free(predestino);
on_actionRegresion_Lineal_triggered();
}
else{
    ////guardar a referencia

    //mat_int16_t *predestino = new mat_int16_t[matvar->dims[1]];
    //aquí se genera un apartado de memoria para guardar lo leído
    double_t *predestino = new double_t[matvar->dims[1]];

    edge[0]=matvar->dims[0];
    edge[1]=matvar->dims[1];

err =
Mat_VarReadData(matfp,matvar,predestino,start,stride,edge);
    if(err != 0)
    {
        //aquí puedes saber si ocurrió un erro de lectura
    }
ref.clear();

for(int i=0; i< edge[1]; i++){

    ref.push_back(predestino[i]);
    qDebug() << ref[i] << "\n";

    if(ref[i]>max){
        max=ref[i];
    }
    if(ref[i]<min){
        min=ref[i];
    }
}

```

```

        }
        std::free(predestino);
    }
}
//esto de abajo lo uso para liberar memoria apartada.
Mat_VarFree(matvar);
//Mat_Close(matfp);
}

void MainWindow::on_actionAbrir_Referencia_triggered() {
    RoM=false;
    abr.exec();
}

void MainWindow::on_actionAbrir_Medicion_triggered() {
    RoM=true;
    abr.exec();
}

void MainWindow::on_actionGraficar_triggered()
{
    if(ref.isEmpty()==false) {
        if(ref.size()>time.size()) {
            time.clear();
            for(int i=0;i<ref.size()-1;i++) {
                time.push_back(i);
            }
        }
        ui->Plot->graph(0)->setData(time, ref);
        // give the axes some labels:
        ui->Plot->xAxis->setLabel("time");
        ui->Plot->yAxis->setLabel("y");
        // set axes ranges, so we see all data:
        ui->Plot->xAxis->setRange(0, time.size());
        ui->Plot->yAxis->setRange(min, max);
        //ui->Plot->yAxis->setRange(-6000, 6000);
        ui->Plot->replot();
    }
    if(med.isEmpty()==false) {
        if(med.size()>time.size()) {
            time.clear();
            for(int i=0;i<med.size()-1;i++) {
                time.push_back(i);
            }
        }
        ui->Plot->graph(1)->setData(time, med);
        // give the axes some labels:
        ui->Plot->xAxis->setLabel("x");
        ui->Plot->yAxis->setLabel("time");
        // set axes ranges, so we see all data:
        ui->Plot->xAxis->setRange(0, time.size());
        ui->Plot->yAxis->setRange(min, max);
        //ui->Plot->yAxis->setRange(-6000, 6000);
        ui->Plot->replot();
    }
}

```

```

    if(res.isEmpty()==false){
        if(res.size()>time.size()){
            time.clear();
            for(int i=0;i<med.size()-1;i++){
                time.push_back(i);
            }
        }
        ui->Plot->graph(2)->setData(time, med);
        // give the axes some labels:
        ui->Plot->xAxis->setLabel("x");
        ui->Plot->yAxis->setLabel("time");
        // set axes ranges, so we see all data:
        ui->Plot->xAxis->setRange(0, time.size());
        ui->Plot->yAxis->setRange(min, max);
        //ui->Plot->yAxis->setRange(-6000, 6000);
        ui->Plot->replot();
    }
}

void MainWindow::on_actionTest_file_triggered()
{
    QFile file("test.txt");
    file.open(QIODevice::Append | QIODevice::Text);
    QTextStream stream(&file);
    stream << "test" << endl;
    file.close();
}

void MainWindow::on_actionRegresion_Lineal_triggered(){

    double mx=0;
    double my=0;
    double sumx=0;
    double sumy=0;
    double b0,b1;
    QVector<double> a;

    for(int i=0; i<med.size();i++){
        mx=mx+med[i];
    }
    mx=mx/med.size();

    for(int i=0; i<ref.size();i++){
        my=my+ref[i];
    }
    my=my/ref.size();

    for(int i=0; i<med.size();i++){
        sumx=sumx+(med[i]-mx)*(med[i]-mx);
    }

    for(int i=0; i<ref.size();i++){
        sumy=sumy+(ref[i]-my)*(ref[i]-my);
    }
}

```

```

b0=sqrt (sumy/(ref.size()))/sqrt (sumx/(med.size()));
b1=my-mx*b0;
a.push_back(b0);
a.push_back(b1);

for(int i=0;i<med.size();i++){
    res.push_back(med[i]*a[0]+a[1]);
}

QFile file("Ganancia.txt");
if ( file.open(QIODevice::Append | QIODevice::Text))
{
    QTextStream stream( &file );
    stream << a[0]<<endl;
}

QFile file2("OffsetV.txt");
if ( file2.open(QIODevice::Append | QIODevice::Text))
{
    QTextStream stream2( &file2 );
    stream2 << a[1]<<endl;
}
}

void MainWindow::on_actionCalculo_de_Confianza_triggered()
{
}

```

```

#include "open.h"
#include "ui_open.h"

Open::Open(QWidget *parent) :
    QDialog(parent),
    ui(new Ui::Open)
{
    ui->setupUi(this);
    QString spath = "C:/";
    dirmodel = new QFileSystemModel(this);
    dirmodel->setRootPath(spath);
    dirmodel->setFilter(QDir::NoDotAndDotDot | QDir::AllDirs);

    filemodel = new QFileSystemModel(this);
    filemodel->setFilter(QDir::NoDotAndDotDot | QDir::Files);
    ui->treeView->setModel(dirmodel);
    ui->listView->setModel(filemodel);
}

Open::~~Open()
{
    delete ui;
}

void Open::on_treeView_clicked(const QModelIndex &index)
{
    QString spath = dirmodel->fileInfo(index).absoluteFilePath();
    ui->listView->setRootIndex(filemodel->setRootPath(spath));
}

void Open::on_listView_doubleClicked(const QModelIndex &index)
{
    path = filemodel->fileInfo(index).absoluteFilePath();
    emit sigpath(path);
}

```