

Design and Construction of a Low-Cost Phasor Measurement Unit (PMU) for Three-Phase Distribution Power Systems according to the norm IEEE C37.118.1

Diseño e Implementación de una (PMU) de baja potencia para Sistemas Trifásicos de Distribución bajo la norma IEEE C37.118.1

A. R. Guamán¹ P. M. Pozo¹ I. A. Pozo¹ N. A. Pozo¹

¹*Departamento de Automatización y Control Industrial, Escuela Politécnica Nacional, Quito-Ecuador
Email: {alex.guaman; marcelo.pozo; isaac.pozo; nataly.pozo}@epn.edu.ec*

Abstract

Phasor Measurement Units (PMU) are widely used in the real-time monitoring of electrical power systems. This work presents the design and construction of a low-cost prototype of PMU. This system allows to estimate phasors, frequency, rate of change of frequency and symmetric components with the time label corresponding to each value estimated in a three-phase network of low power using the IEEE standard C37.118.1. All these parameters are synchronized using the signals from a Global Positioning System GPS as a time reference.

The system uses as a base a development platform controlled by a Digital Signal Processor (DSP) and the estimation of the synchrophasors is done using the Discrete Fourier Transform (DFT).

Initially, a phasor estimation method is presented, after the implemented hardware and software is described, then the results obtained from the measurements are presented in order to verify the correct functioning of the equipment. Finally, operation tests are performed to validate the prototype according to the IEEE C37.118.1 standard.

Index terms— Digital Signal Processor, Discrete Fourier Transform, Fasorial Estimation, Phasor Measurement Unit, PMU.

Resumen

Las Unidades de Medición Sincrofasorial (PMU) son ampliamente usadas en la supervisión en tiempo real de los sistemas eléctricos de potencia. En este trabajo se presenta el diseño e implementación de una PMU prototipo de bajo costo que permite estimar fasores, frecuencia, tasa de cambio de frecuencia y componentes simétricas con la etiqueta de tiempo correspondiente a cada valor estimado en una red trifásica de baja potencia utilizando el estándar IEEE C37.118.1. Cada uno de estos parámetros se sincronizan usando como referencia de tiempo las señales provenientes de un Sistema de Posicionamiento Global (GPS).

El sistema utiliza como base una plataforma de desarrollo controlada por un Procesador Digital de Señales (DSP) y la estimación de los sincrofasores se realiza usando la Transformada Discreta de Fourier (DFT).

Inicialmente se presenta un método de estimación fasorial, luego se describe el hardware y software implementado, después se presentan los resultados obtenidos de las mediciones efectuadas para verificar el correcto funcionamiento del equipo. Finalmente se efectúan pruebas convencionales para validar las mediciones que realiza la PMU para el uso clase P y pruebas que permiten verificar los parámetros de operación de acuerdo con la norma IEEE C37.118.1.

Palabras clave— Estimación Fasorial, Procesador Digital de Señales, PMU, Transformada Discreta de Fourier, Unidad de Medición Sincrofasorial.

Recibido: 31-05-2019, Aprobado tras revisión: 19-07-2019

Forma sugerida de citación: Guamán, A.; Pozo, M.; Pozo, I.; Pozo, N. (2019). "Diseño e implementación de una (PMU) de baja potencia para Sistemas Trifásicos de Distribución bajo la norma IEEE C37.118.1". Revista Técnica "energía". No. 16, Issue I, Pp. 8-16

ISSN On-line: 2602-8492 - ISSN Impreso: 1390-5074

© 2019 Operador Nacional de Electricidad, CENACE



1. INTRODUCCIÓN

Las redes de monitoreo de área extendida (WAMS) se utilizan para supervisar, proteger y controlar un sistema eléctrico. Estos sistemas están compuestos de una red interconectada de dispositivos, de entre los cuales las Unidades de Medición Sincrofásorial (PMU por sus siglas en inglés) se encargan de obtener los fasores de un punto del sistema bajo supervisión en un determinado momento [2].

Una PMU es un dispositivo de adquisición de datos que permiten estimar sincrofasores, frecuencia y tasa de cambio de frecuencia (ROCOF) con la etiqueta de tiempo que muestra el instante en que son estimadas [3]. El sincrofasor es un número complejo que muestra la amplitud y fase de una señal sinusoidal donde el ángulo de fase se determina con respecto a una referencia absoluta de tiempo en este caso el Tiempo Universal Coordinado (UTC) [4]. Es decir, el ángulo de fase se calcula usando el UTC como referencia de tiempo, permitiendo de esta manera tener una única referencia para todas las señales que van a ser medidas en un área global. Esto facilita analizar los fasores calculados en diferentes puntos de la red de dimensiones de área muy extensa porque están relacionados por instantes de tiempo similares.

En la PMU la sincronización y la información de tiempo se obtiene del sistema de posicionamiento global (GPS). El Oscilador de Enganche de Fase (PLL por sus siglas en inglés) produce una señal de pulsos que controla y sincroniza el Convertidor Análogo a Digital (ADC). Las muestras son enviadas al Procesador Digital de Señales (DSP) donde se realizan las estimaciones fasoriales y se genera la etiqueta de tiempo. Esta información es transmitida a un dispositivo receptor para su posterior análisis [5]. En la Fig1. Se puede observar el diagrama esquemático de la estructura básica de una PMU [7]

Las PMUs son instrumentos de medición comerciales de alta precisión se ubican generalmente en los sistemas de transmisión por su elevado costo. En la actualidad, debido a la introducción de las redes eléctricas inteligentes, las cuales requieren monitoreo en tiempo real, el interés en las PMUs domésticas y para redes de distribución y subdistribución ha aumentado significativamente. Por tal razón, en este trabajo se plantea el desarrollo de un prototipo y las respectivas pruebas de funcionamiento de una PMU de bajo costo para sistemas de bajo voltaje [15].

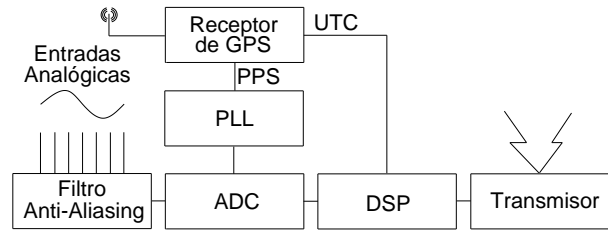


Figura. 1: Diagrama esquemático de la estructura básica de una PMU [7]

2. ESTIMACIÓN FASORIAL

2.1. Estimación Fasorial para señales a la frecuencia nominal usando DFT

Dada una función sinusoidal $x(t)$ definida por:

$$X(t) = X_m \cos(2\pi f_0 t + \varphi) \quad (1)$$

Donde $X(t)$ es muestreada a una frecuencia Nf_0 . Siendo un ángulo de muestreo $\theta = 2\pi/N$, las muestras de la señal sobre una ventana de N muestras puede ser descrita como:

$$X_n(t) = X_m \cos(n\theta + \varphi) \quad (2)$$

Donde: $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$

Aplicando las propiedades de la transformada discreta de fourier se puede obtener el fasor de frecuencia fundamental del conjunto de muestras X_m mediante la siguiente ecuación:

$$X = \frac{X_m}{\sqrt{2}} [\cos\varphi + j \sin\varphi] = \frac{X_m}{\sqrt{2}} e^{j\varphi} \quad (3)$$

Para realizar el algoritmo de estimación se debe dar una ventana inicial de N muestras de la señal de entrada. Con cada muestra posterior se recorre la ventana y se repite el proceso de cálculo. Cada fasor estimado en el proceso tendrá la misma magnitud, pero se desfazan entre sí un ángulo de $n\theta$ como se observa en la Fig. 2. Para calcular el fasor 1 representado por X^{N-1} y el fasor 2 representado por X^N se lo realiza de la siguiente forma: [8]

$$X^{N-1} = \sum_{n=0}^{N-1} X_n [\cos(n\theta) - j \sin(n\theta)] = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X_n e^{-jn\theta} \quad (4)$$

$$X^N = \sum_{n=0}^{N-1} X_{n+1} [\cos(n\theta) - j \sin(n\theta)] = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X_{n+1} e^{-jn\theta} \quad (5)$$

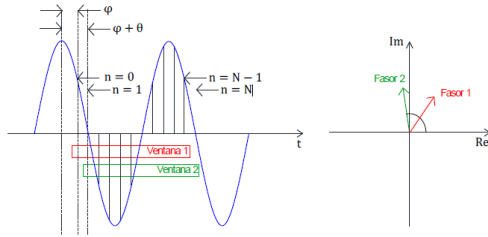


Figura. 2: Estimación fasorial usando el algoritmo DFT no recursivo [8]

2.2. Estimación fasorial para señales de entrada fuera de la frecuencia nominal

Debido a que la frecuencia de la red eléctrica varía constantemente como consecuencia de las interacciones por la demanda de energía en la red. Para realizar la estimación fasorial se utiliza el algoritmo de DFT y es necesario realizar un ajuste a la frecuencia nominal. En la Fig 3 se ilustra una señal con una frecuencia menor a la nominal.

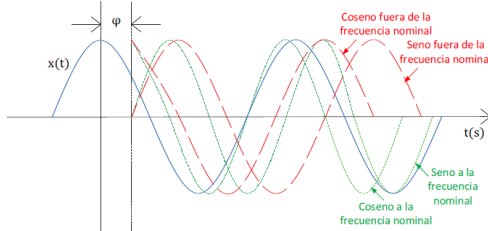


Figura. 3 Estimación fasorial usando el algoritmo DFT para una señal fuera de la frecuencia nominal [8]

A partir de un análisis matemático del fasor $X(t)$ [8]

$$X' = PXe^{j(\omega - \omega_0)\Delta t} + QXe^{-j(\omega + \omega_0)\Delta t} \quad (6)$$

$$P = \left\{ \frac{\sin\left(\frac{N(\omega - \omega_0)\Delta t}{2}\right)}{N \sin\left(\frac{(\omega - \omega_0)\Delta t}{2}\right)} \right\} e^{j(N-1)\frac{(\omega - \omega_0)\Delta t}{2}} \quad (7)$$

$$Q = \left\{ \frac{\sin\left(\frac{N(\omega + \omega_0)\Delta t}{2}\right)}{N \sin\left(\frac{(\omega + \omega_0)\Delta t}{2}\right)} \right\} e^{-j(N-1)\frac{(\omega + \omega_0)\Delta t}{2}} \quad (8)$$

La ecuación (6) representa el fasor estimado de la señal fuera de la frecuencia nominal donde la desviación entre la frecuencia de la señal y la frecuencia nominal dependen del valor de P y Q. [8]

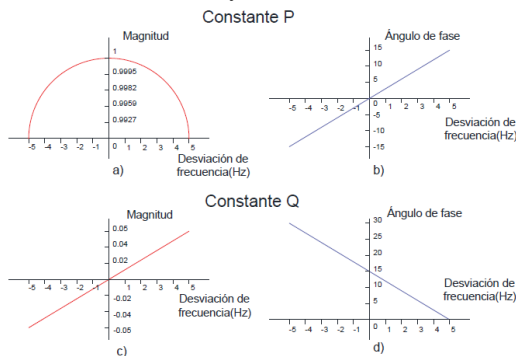


Figura. 4: Efecto de la estimación fasorial para señales fuera de la frecuencia nominal: a) y b) variación en la magnitud y fase del coeficiente P, c) y d) variación en la magnitud y fase del coeficiente Q [8]

2.3. Estimación de las componentes simétricas de un sistema trifásico

Un sistema trifásico simétrico y balanceado es aquel donde cada fasor debe estar desfasado entre sí 120 grados y de amplitud y frecuencia iguales. Sin embargo, no se cumple esto debido a la conexión de cargas desbalanceadas o fallas de sistemas.

Un sistema trifásico desbalanceado puede ser descompuesto en la suma de tres grupos simétricos de fasores balanceados de: secuencia positiva, negativa y cero. [9]

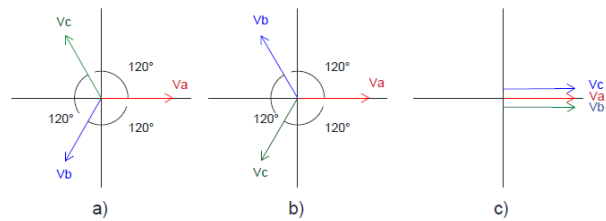


Figura. 5: Secuencia de fases: a) secuencia positiva, b) secuencia negativa, c) secuencia cero [9]

Dado un sistema trifásico representado por: [9]

$$\begin{cases} X_a = Re(X_a e^{j\omega t}) \\ X_b = Re(X_b e^{j(\omega t - \frac{2\pi}{3})}) \\ X_c = Re(X_c e^{j(\omega t + \frac{2\pi}{3})}) \end{cases} \quad (9)$$

Resolviendo para un sistema con componentes simétricas se deduce que los fasores de cada secuencia son: [9]

$$X_0 = \frac{1}{3}(X_a + X_b + X_c) \quad (10)$$

$$X_+ = \frac{1}{3}(X_a + X_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + X_c e^{-j\frac{2\pi}{3}}) \quad (11)$$

$$X_- = \frac{1}{3}(X_a + X_b e^{-j\frac{2\pi}{3}} + X_c e^{j\frac{2\pi}{3}}) \quad (12)$$

En operación normal se puede observar que el valor de la secuencia positiva es mucho mayor a las otras componentes, pero en presencia de falla es menor. El margen de variación entre la secuencia negativa y cero respecto a la positiva permite determinar el nivel de desbalance del sistema.

3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PMU DE BAJO COSTO PARA UN SISTEMA TRIFÁSICO DE BAJA POTENCIA

3.1. Desarrollo de hardware

En la Fig. 6 se puede observar el esquema de conexión e interacción entre los sistemas que conforman

la PMU desarrollada. En color rojo y naranja se representan líneas de alimentación y circuitos analógicos respectivamente. En verde están representadas las señales de entrada y en azul los buses de datos digitales.

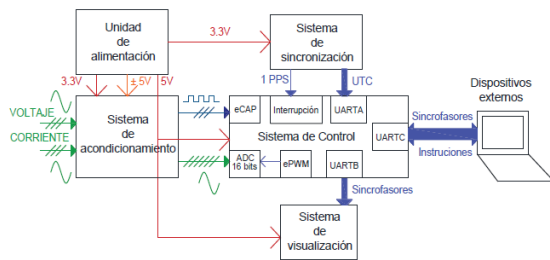


Figura. 6: Diagrama de bloques del hardware de la PMU

3.1.1. Sistema de sincronización

En la sincronización del sistema se utiliza un módulo GPS de DIGILENT que cuenta con comunicación UART y la posibilidad de conectar una antena para exteriores. Este sistema permite obtener una referencia de tiempo fija para calcular los fasores. [10]

3.1.2. Sistema de sensado de variables

Las variables que se van a medir son: voltaje, corriente y frecuencia de la red eléctrica. El esquema para la medición de voltaje se lo puede observar en la Fig. 7 que consiste en tres etapas. La primera reduce el voltaje de entrada a uno que pueda manejar el microcontrolador, la segunda corresponde a un circuito amplificador diferencial con ganancia unitaria y la tercera un filtro pasa bajo.

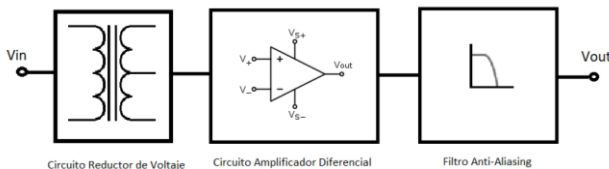


Figura. 7: Circuito de sensado de voltaje

Para el circuito de corriente se utiliza un sensor de efecto hall T604004 de Vacuumschmelze que tiene aislamiento galvánico y entrega una salida de voltaje proporcional a una entrada de corriente. La corriente de entrada es soportada de 0 a 15A. [12]

El circuito de sensado de frecuencia que se utilizó fue un detector de cruce por cero que envía pulsos al microcontrolador y corresponde a la mitad del período de la señal.

3.1.3. Sistema de visualización

Para la visualización de los datos y los resultados obtenidos se utiliza la tarjeta de desarrollo STM32F746Discovery de STMicroelectronics que incluye una pantalla LCD táctil la cual se comunica la parte visual mediante un puerto UART y con comunicación I2C las funciones táctiles. [13]

3.2. Desarrollo de Software

3.2.1. Software para el sistema de control

Para el sistema de control se utiliza la tarjeta F28379D de la serie C2000 de TI. Esta tarjeta cuenta con dos núcleos los cuales pueden ser programados de forma en que las tareas se dividan y puedan realizarse de forma eficiente. El primer núcleo se encarga del muestreo de señales y cálculo de estimaciones como se observa en la Fig. 8, mientras que el segundo núcleo se encarga de las comunicaciones con los dispositivos externos. [11]

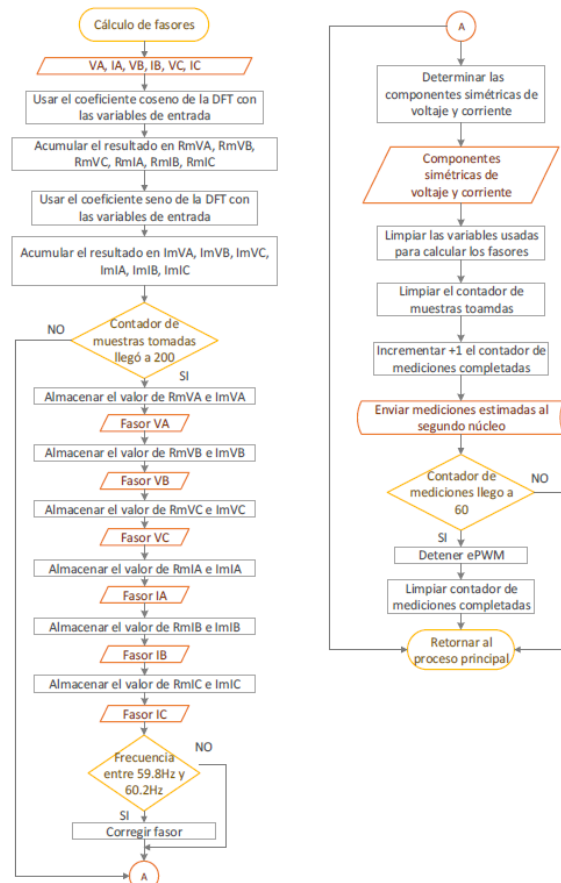


Figura. 8: Diagrama de flujo de subrutina para cálculo de fasores

3.2.2. Software para el sistema de visualización

La rutina realizada para la visualización por medio de la tarjeta STM32F746 consiste en un programa que configura inicialmente los periféricos para después entrar en un lazo infinito que le permite reaccionar ante el ingreso de un comando por parte del usuario. Las opciones que tiene el usuario son mostrar frecuencia, RCOF, tiempo UTC; sincrofasores o componentes simétricas.

3.2.3. Software de la interfaz gráfica en la computadora

Para la interfaz gráfica se utilizó la plataforma LabVIEW que muestra los datos obtenidos del

microcontrolador de forma ordenada en una tabla y de manera gráfica los sincrofasores. También permite enviar comandos para habilitar o deshabilitar el envío de mensajes de datos o establece la tasa de transferencia de mediciones. En la Fig. 9 se muestra la interfaz implementada.

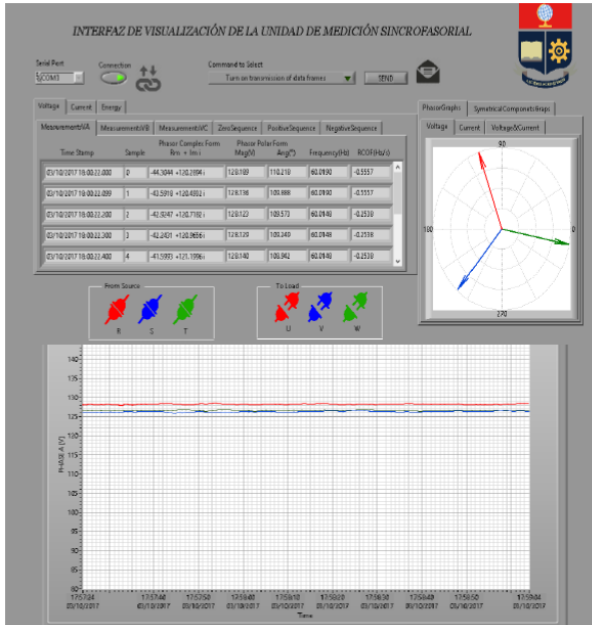


Figura. 9: Interfaz gráfica implementada en LabVIEW

3.3. Costo final del proyecto

Si se toma únicamente en cuenta el costo de fabricación, el precio sería de \$895, sin embargo, se debe destacar que al producir más dispositivos en serie existiría una disminución del precio debido al decremento del costo al comprar componentes al por mayor. Tomando como referencia el modelo PMU0100 de la marca VIZMAX cuyo costo es de \$10 000,00; se puede notar que el desarrollo de esta PMU tiene una ventaja sustancial en el precio.

En la Fig. 10 se puede observar el dispositivo que se implementó.



Figura. 10: PMU implementado

4. PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1. Pruebas Convencionales

Con el propósito de validar los valores que son medidos por la PMU se compara estos valores con un

múltímetro Fluke 87V con exactitud de $\pm 0.5\%$, una punta de prueba de corriente Fluke 800i de exactitud $\pm 3\%$ y el osciloscopio Tektronix TDS2022C. [13]

4.1.1. Prueba de variación de voltaje

La prueba se la realizo con un autotransformador a la entrada de la PMU y en vacío. Los resultados son los siguientes:

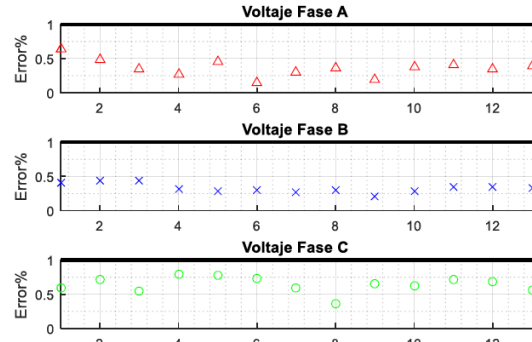


Figura. 11: Errores en la medición de voltaje RMS

4.1.2. Prueba con carga resistiva

Para la prueba de corriente se utilizó una carga de tipo resistiva con conexión estrella con neutro para poder variar la corriente en cada fase. Los resultados se muestran en la Fig. 12:

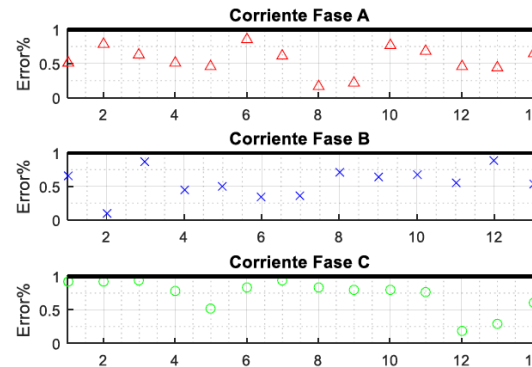


Figura. 12: Errores en la medición de corriente con carga resistiva

Para una carga resistiva se espera que los fasores de voltaje y corriente se encuentren en fase. Este resultado se lo observa en la Fig 13.

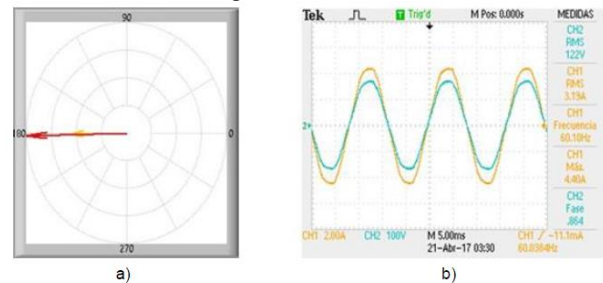


Figura. 13 Prueba carga resistiva: a) Diagrama fasorial, b) Formas de onda

4.1.3. Prueba con carga inductiva

Para la carga inductiva se realizan pruebas de voltaje, corriente y factor de potencia. En la Fig 14 se presentan los resultados de las mediciones tomadas de corriente RMS en función de su error.

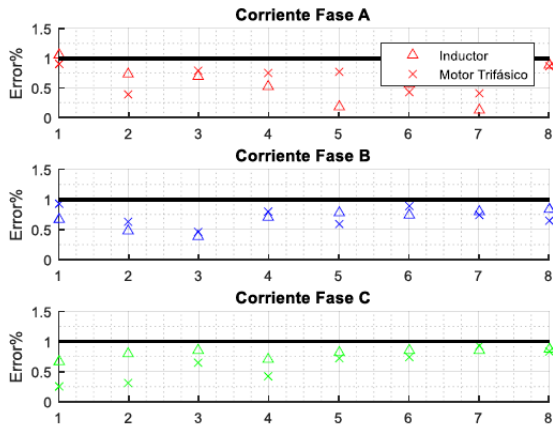


Figura 14: Errores en la medición de corriente con carga inductiva

En la Fig. 15 se puede observar el desfase que existe debido a que es una carga inductiva. En color azul se representa el fasor de voltaje y en negro el de corriente.

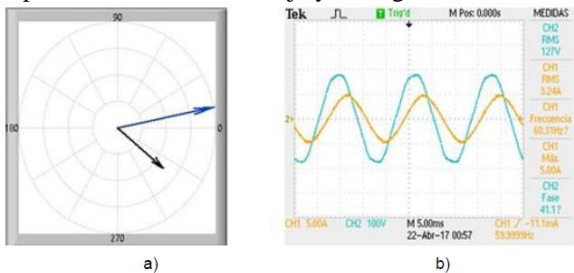


Figura 15: Prueba carga inductiva: a) Diagrama fasorial, b) Formas de onda

A su vez se realizó una prueba con un motor trifásico y como se puede observar en la Fig. 16 los voltajes y corrientes están retrasadas con respecto a su correspondiente fasor de voltaje.

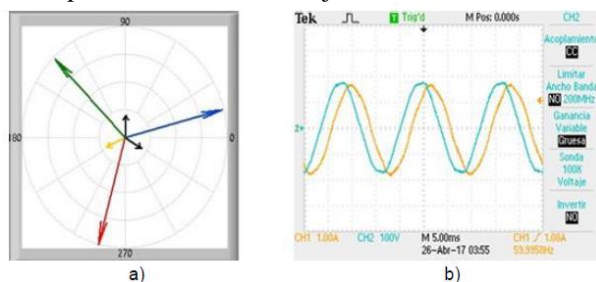


Fig. 16: Prueba con motor trifásico: a) Diagrama fasorial, b) Formas de onda

4.1.4. Prueba con carga capacitiva

Para la prueba capacitiva se utilizó un banco de capacitores en serie con un reóstato. El resultado de las mediciones de corriente RMS tomadas en la fase A se las puede observar en la Fig. 17.

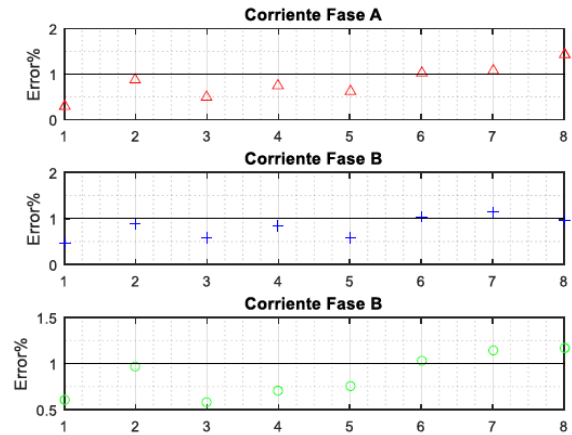


Figura 17: Errores en la medición de corriente con carga capacitiva

En la Fig. 18 se muestra que el fasor de corriente (negro) se encuentra en atraso respecto al fasor de voltaje (verde).

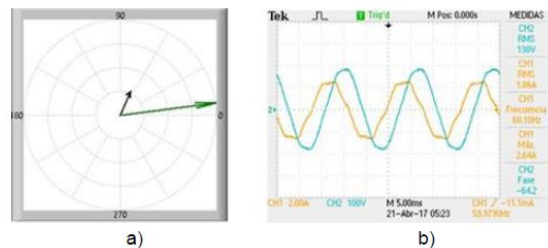


Figura 18: Prueba con carga capacitiva: a) Diagrama fasorial, b) Formas de onda

4.1.5. Prueba con variación de frecuencia

Las pruebas de frecuencia se las realizaron con un generador de funciones en modo sinusoidal el resultado promedio de error entre el voltaje real y el voltaje medido fue de 1,213% y el error promedio entre frecuencia real y frecuencia medida fue de 0,069%.

4.2. Pruebas para sincrofasores referentes a la norma IEEE C37

4.2.1. Criterios de evaluación para sincrofasores

El TVE (por sus siglas en ingles Total Vector Error) es una expresión establecida por la norma IEEE C37.118.1 que permite evaluar la diferencia entre un fasor teórico y el estimado por la PMU en un mismo instante de tiempo y bajo condiciones conocidas. Se lo define de la siguiente forma: [14]

$$TVE(\%) = \sqrt{\frac{(\overline{X_r} - X_r)^2 + (\overline{X_i} - X_i)^2}{(X_r - X_r)^2}} \tag{13}$$

Donde X_r y X_i son la componente real e imaginaria respectivamente del sincrofasor teórico y son comparadas con sus respectivas componentes del sincrofasor estimado por la PMU. Las condiciones de la norma son presentadas en la siguiente tabla: [14]

Tabla 1: Condiciones de evaluación para clase P de acuerdo con la norma IEEE C37.118.1 [16]

Parámetros de evaluación	Condiciones de referencia	Rango	TVE (%)
Frecuencia	60Hz	± 2 Hz	1,0
Magnitud de voltaje	120V	80% al 120% de ref.	1,0
Magnitud de corriente	2A	10% al 200% de ref.	1,0
Ángulo de Fase	0°	$\pm 180^\circ$	1,0
Distorsión Armónica	< 0,2%	1% de hasta el 50th	1,0

4.2.2. Pruebas de variación de magnitud

Para este ensayo se mantiene una frecuencia constante de 60Hz, el ángulo de fase en 0° y se simula un incremento de la amplitud entre el 80% y el 120% del valor nominal para la señal de voltaje y para la señal de corriente se realiza una variación entre el 10% y el 200%. El resultado promedio para la magnitud voltaje fue un TVE de 0,206% y para la magnitud de corriente fue de 0,551%

4.2.3. Pruebas de variación de ángulo de fase

Para el ensayo de ángulo se debe mantener un voltaje constante de 120 V, una corriente constante de 2 A y una frecuencia de 60Hz. El ángulo varía entre $\pm 180^\circ$ y se obtuvo un TVE promedio de 0,78% para el voltaje y de 0,34% para la corriente.

4.2.4. Pruebas de variación de frecuencia

De forma parecida a los anteriores ensayos se mantienen constantes las magnitudes que no van a ser evaluadas y se varía en este caso la frecuencia desde 58Hz a 62Hz. Para este caso se obtuvo un TVE promedio de 0,511% para el voltaje y de 0,586% para la corriente.

4.2.5. Pruebas de variación de distorsión armónica

Para esta prueba se debe obtener un THD menor al 0.2% mientras todos los demás parámetros se mantienen constantes. El TVE promedio que se obtuvo para el voltaje fue de 0,105% y para la corriente fue de 0,371%.

4.3. Pruebas para la estimación de componentes simétricas

Como se mencionó en secciones anteriores la PMU debe ser capaz de estimar las componentes simétricas. Para este ensayo se analizó las señales de voltaje para obtener las componentes de secuencia cero, positiva y negativa representadas por el color rojo, azul y verde respectivamente. La fig. 19 muestra un sistema

ligeramente desbalanceado de secuencia positiva. En la Fig. 20 se muestra el diagrama de una secuencia negativa al intercambiar la conexión entre B y C. Para la Fig 21. Solo se conecta una única fase. En la Fig 22. Se muestra una red desbalanceada donde solo están conectadas 2 fases.

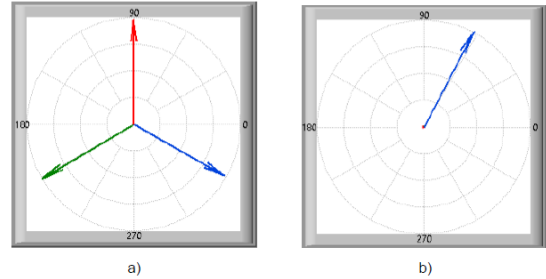


Figura. 19: Diagramas fasoriales de secuencia positiva: a) Fasores, b) Componentes simétricas

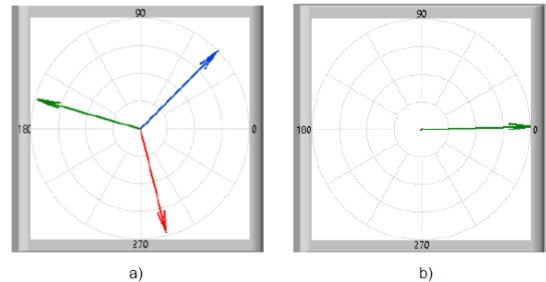


Figura. 20: Diagramas fasoriales de secuencia negativa: a) Fasores, b) Componentes simétricas

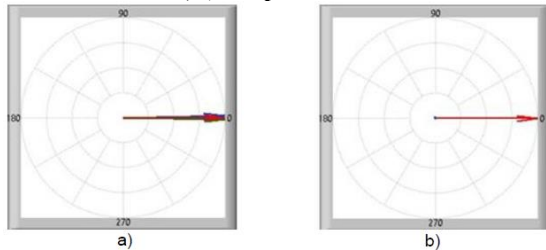


Figura. 21: Diagramas fasoriales de secuencia cero: a) Fasores, b) Componentes simétricas

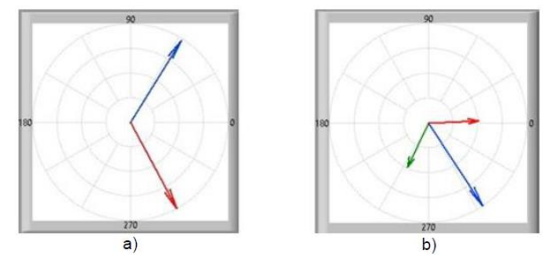


Figura. 22: Diagramas fasoriales de un sistema desbalanceado: a) Fasores, b) Componentes simétricas

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se diseñó e implementó un medidor sincrofasorial de baja potencia bajo la norma IEEE C37.118.1 cumpliendo con el objetivo principal de este proyecto.

El algoritmo de la DFT utilizado en este equipo está ajustado para obtener el fasor de frecuencia nominal. En el caso cuando la señal tiene una frecuencia distinta se reportan medidas erróneas lo cual representa una

desventaja que requiere la aplicación del algoritmo de corrección. Este nuevo algoritmo representa mayor tiempo de procesamiento. No obstante autoajustar el algoritmo a la frecuencia determinada también requiere que se ajusten parámetros adicionales particularmente el periodo de muestreo de las señales dificultando su implementación.

El equipo está en capacidad de operar en sistemas trifásicos de bajo voltaje balanceados y desbalanceados ya que además de adquirir los fasores que describen al sistema permite determina las componentes simétricas. Esta característica resulta especialmente útil para analizar sistemas trifásicos desbalanceados.

Esta PMU depende del sistema de recepción de GPS para operar. Las mediciones se llevan a cabo únicamente mientras exista el pulso de sincronismo con el GPS. De tal forma que es necesario garantizar la correcta recepción de la señal de GPS colocando el equipo en un área donde exista el mínimo de interferencia.

El sistema de procesamiento debe ser rápido porque al ser un sistema embebido se encarga de sensar las señales y procesar las muestras mencionadas ejecutando los algoritmos necesarios para estimar los fasores. Adicionalmente manejar el protocolo de comunicación en tiempo real requiere alta disponibilidad del dispositivo. En consecuencia, el procesador de doble núcleo de este sistema es adecuado porque permite manejar las comunicaciones y la medición fasorial por separado. De esta manera que no existan conflictos en la ejecución de los procesos mencionados.

Analizando los resultados de las pruebas tradicionales se concluye que el equipo desarrollado tiene una exactitud del 1% cuando las señales que se encuentran bajo monitoreo y no incorporan altos niveles de distorsión. No se toma en consideración los resultados para las señales distorsionadas porque de acuerdo con la norma estos dispositivos deben operar en un sistema con bajos niveles de contenido armónico.

Los errores del TVE encontrados mediante las pruebas en las cuales se modifica un solo parámetro de acuerdo con los criterios de evaluación de la norma IEEE C37.118.1 se encuentran por debajo del límite de precisión establecido. De igual manera el equipo se comunicó con el software que permite verificar que el protocolo de comunicación este de acuerdo con la norma IEEE C37.118.2. Por lo tanto, se puede discernir que el equipo trabaja de acuerdo con el estándar IEEE C37.118.

Se recomienda implementar un segundo prototipo de PMU similar al del presente proyecto de manera que puedan ser colocados en distintas ciudades. Con lo cual se puede apreciar realmente la utilidad de los equipos de medición fasorial sincronizados mediante una fuente universal de tiempo.

Para trabajos futuros se recomienda integrar una fuente de respaldo de energía que permita al dispositivo

operar cuando se presentan fallos que provocan el corte de suministro eléctrico. Además, se puede incorporar un mecanismo que permita almacenar un registro de las mediciones obtenidas en un sistema de respaldo para almacenar esta información en una memoria externa.

Debido a la falta de recursos en este proyecto no se ha podido realizar una comparación con un equipo comercial y se recomienda realizar diferentes pruebas que

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. R. Guamán, "Diseño e implementación de un medidor sincrofasorial de baja potencia bajo la norma IEEE C37.118.1," tesis de pregrado, DACI, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2018.
- [2] "The Global Positioning System," GPS, 2017.
- [3] The Data Conversion Handbook, 1st ed. Oxford, Analog Devices, Burlington, USA, 2005.
- [4] M. Faúndez, "Módems," en Sistemas de Comunicaciones. Barcelona, España: Marcombo, 2001, ch. 8, pp. 208-242.
- [5] P. Correia, Guía Práctica del GPS. Barcelona: Marcombo, 2002.
- [6] "Sistema de calibración de unidad de medición fasorial 6135A / PMUCAL", FLUKE, Operators Manual.
- [7] B. Hernández, "Diseño e implementación de un medidor fasorial síncrono normalizado," Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional, México D.F., 2009.
- [8] A. G. Phadke and J. S. Thorp, Synchronized Phasor Measurement and Their Applications. New York: Springer, 2008.
- [9] J.L. Kirtley, "Introduction To Symmetrical Components," Dept. Electrical Engineering and Computer Science, MIT, Supplementary Notes 4 2001.
- [10] Linx, "Antenna Factor by Linx," ANT-GPS-SH datasheet, Jan. 2014.
- [11] "LAUNCHXL-F28379D Overview," Texas Instruments, User's Guide.
- [12] Vacuumschmelze, "15 A Current Sensor for 5V-Supply Voltage," T60404-N4646-X662 datasheet, Aug. 2014
- [13] "Fluke 80 Series V Digital Multimeters: The Industrial Standard," FLUKE.
- [14] IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems, IEEE Standard C37.119.1, 2011



Alex Guamán, nació en Riobamba-Ecuador el 13 de abril de 1992. Realizó sus estudios secundarios en la Unidad Educativa San Felipe Neri. Para sus estudios superiores ingreso a la Escuela Politécnica Nacional, a la carrera de Ingeniería en Electrónica y Control, muy próximo a obtener el grado de

Ingeniero en Electrónica y Control. Áreas de interés: Electrónica de Potencia, Instrumentación Electrónica, Control con Microprocesados, Sistemas SCADA.



Marcelo Pozo, nació en Quito-Ecuador. Se graduó en la Escuela Politécnica Nacional como Ingeniero en Electrónica y Control en 1999. Gracias a una beca del Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD) estudió su Masterado en la Universidad

Técnica de Dresden-Alemania obteniendo el título de Master en Ingeniería Eléctrica (M.Sc.E.E) en Septiembre del 2002. Entre el 2003 y 2009 se dedicó al trabajo en la industria. A partir de septiembre del 2009 se desempeña en el cargo de Profesor Principal a tiempo completo en el Departamento de Automatización y Control Industrial (DACI) de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional-Quito, Ecuador. Entre finales del 2010 y principios del 2015 realizó su proyecto de Doctorado en Ingeniería en la Universidad de Siegen-Alemania, especializándose en Electrónica de Potencia y Control Electrónico de Máquinas Eléctricas. Actualmente es Jefe del Laboratorio de Electrónica de Potencia, Control de Máquinas y Smart Grids en el DACI de la Escuela Politécnica Nacional. Además, es presidente 2019 del Joint Chapter Industrial Electronics-IES & Control Systems-CSS de la IEEE-Ecuador. Sus áreas de interés son: Electrónica de Potencia, Control Electrónico Industrial, Control Electrónico de Máquinas Eléctricas, Calidad y Uso Eficiente de la Energía, Control y Conversión Estática a partir de Fuentes de Energía Alternativas, Regenerativas y Renovables, Redes Eléctricas Inteligentes-Smart Grids, Sistemas de Transporte y Movilidad Eléctricos.



Isaac Andrés Pozo. – Nació el 1ro de abril de 1995 en Quito-Ecuador. Recibió su título de Ingeniera Electrónica y control de la Escuela Politécnica Nacional en 2018. Actualmente, es auxiliar de investigación en el laboratorio de control con máquinas de la EPN y

su campo de investigación se encuentra relacionado con

la electrónica de potencia y el control de máquinas eléctricas. Su área de interés es el control industrial, sistemas microprocesados, instrumentación industrial y la electrónica de potencia.



Nataly Aracely Pozo Viera, nació en Píllaro- Tungurahua –Ecuador, el 10 de Febrero de 1991. Estudió en el Colegio “Santo Domingo de Guzmán” – Ambato. Se desempeñó como Ayudante del Laboratorio de Control Industrial del Departamento de Automatización y Control

Industrial (DACI) de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la EPN en el año 2014. En el mencionado año se graduó como Ingeniera en Electrónica y Control en la Escuela Politécnica Nacional. A partir de entonces se trabajó como Técnico Docente Politécnico (DACI - EPN). En el año 2015- 2016 estudió en la Universidad de Newcastle – Reino Unido, en donde obtuvo el título de M.Sc. Electrical Power. Actualmente se desempeña en el cargo de Profesora a Tiempo Completo en el Departamento de Automatización y Control Industrial de la EPN. Sus áreas de interés son: Electrónica de Potencia, Convertidores Estáticos, Energía Renovable, Redes Eléctricas Inteligentes, Diseño y Control de Máquinas.