



## Implementación de un sistema de monitoreo de área amplia a escala de laboratorio para sistemas eléctricos de potencia

## Implementation of a Wide Area Monitoring System on a laboratory scale for Power Systems

López de Alba Carlos Alberto

Universidad de Guadalajara

Correo: [ing\\_carlos.lopez@hotmail.com](mailto:ing_carlos.lopez@hotmail.com)

Apodaca-Zamora Federico

Universidad de Guadalajara

Correo: [faz\\_2589@hotmail.com](mailto:faz_2589@hotmail.com)

Ortiz-Muro Víctor Hugo

Universidad de Guadalajara

Departamento de Ingeniería Mecánica Eléctrica

Correo: [victor.ortiz@cucei.udg.mx](mailto:victor.ortiz@cucei.udg.mx)

### Resumen

Los sistemas eléctricos de potencia operan bajo condiciones controladas producto de una planeación estratégica y monitoreo de diversos procesos mediante Sistemas de Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA). Esas herramientas de apoyo se forman por cantidad de dispositivos que terminan alimentando software que resuelve ciertas aplicaciones de tiempo real. La mayoría de aplicaciones actualmente responden con una demora del orden de segundos en tanto se agrupa la información desde distintas subestaciones y se controlan errores del proceso. Reducir ese intervalo de concentración de la información de tiempo real y elevar la precisión de la medición global de la red es tema de investigación en la comunidad de expertos. La tendencia mundial es recurrir a nuevas tecnologías de comunicaciones y de medición digital, ambas operando con registros digitalizados con una referencia de tiempo global. Ese es el concepto de sistema de monitoreo de área amplia (WAMS), como sistema que alimenta aplicaciones de registros provenientes de unidades de medición fasorial sincronizadas (PMU). El artículo describe un WAMS virtual a escala de laboratorio aplicable a probar futuras aplicaciones. Bajo ese enfoque se diseñaron PMU que remiten datos con una tasa de transmisión de datos de entre 10 y 60 paquetes por segundo. Se expone como se implementó la interfaz gráfica, características y estructura acoplada a una plataforma de simulación de tiempo real.

Descriptores: PMU, WAMS, SCADA.

### Abstract

Interconnected Power Systems perform as result of strategic plans and by monitoring processes with Supervisory, Control and Data Acquisition (SCADA) System. These tools used to be formed by several devices feeding dedicated software responding on-line. Such programmed applications suffer a delay by the order of seconds while substation information is grouped and internal error of processes is controlled. Reduction of time for concentrating real time information and data precision becomes a research topic for the community of experts. Worldwide tendency is the use of new technologies such as digital communication systems and digital measurement, they both dealing with a common time reference. That's our concept of WAMS as an element dedicated for feeding software applications taking data from PMU's. Under that assumption, we present PUM designs transmitting data in the order of 10-60 samples per second. The article describes a virtual WAMS at laboratory scale for assessing future applications. It is exposed the user interface, characteristics and the structure coupled to a real time simulator.

Keywords: PMU, WAMS, SCADA.

### INTRODUCCIÓN

Gran responsabilidad de la seguridad del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) se deja a los operadores de los Centros de Control; ellos ejecutan las maniobras para ajustar el despacho de generación y los perfiles de voltaje. Pese a que la mayor parte del tiempo el SEP prevalece en un estado normal de operación, en tiempo real se alimentan aplicaciones o programas de computado-

ra que se ocupan de detectar condiciones de riesgo, sea producto de cambios de comportamiento dinámico de la carga, de nuevos flujos de potencia, maniobras de mantenimiento, etcétera.

Por la gran dimensión y tecnologías utilizadas en los SEP el tiempo de arribo de datos es cambiante o incluso en ocasiones se pierde la comunicación. Las aplicaciones de tiempo real deben considerar esa situación en su proceso para seguir ofreciendo un dato confiable.

Con una arquitectura tradicional de sistema de Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA) es común acumular tiempos del orden de  $\frac{1}{2}$  a 2 segundos, previo a presentar una imagen visual o señalar alguna violación de límites operativos (Gaushell y Darlington, 1987). Ese tiempo se convierte en una restricción tecnológica de los SCADA tradicionales, que además solo manejan magnitudes del voltaje y de las corrientes por las líneas. Esos dos datos directamente entran a una etapa de cálculo para despejar otras variables de interés, por lo general mediante un programa denominado de *estimación de estados* (Schweppe and Wildes, 1970; Phadke *et al.*, 1986).

A mediados de los 80's se dieron a conocer conceptos y aplicaciones con Sincrofasores (Phadke, 2002). El proceso conocido para conseguir un fasor en un medidor digital donde se añade una etapa para asignar un tiempo global proveniente del GPS (Global Positioning System). Entonces los registros provenientes de la subestación manejan información de tiempo-espacio de forma sincronizada, lo cual permite trasladarles manteniendo una referencia común y prescindiendo de los retrasos en la transmisión de datos (De la Ree *et al.*, 2010; Kenneth, 2013). La Figura 1 muestra el esquema típico para remitir registros desde Unidades de Medición Fasorial (PMU) hasta un algoritmo concentrador, sea en el nivel de subestación o a otro nivel superior.

La presencia masiva de equipos PMU permite a las empresas buscar alternativas de seguimiento al SEP, pero ahora con registros tomados en el mismo instante. El nuevo Sistema de Monitoreo de Área Amplia (WAMS) debe adaptarse para aprovechar la mayor cantidad de datos, aumentando por tanto la resolución y la posibilidad de probar nuevos métodos y aplicaciones (Anjia *et al.*, 2005; Phadke y De Moraes, 2008).

En este trabajo se describe una estructura de WAMS implementado para monitorear una red de prueba a escala de laboratorio. Se ejecutan rutinas sobre una plataforma de simulación tiempo real que hace las veces de

adquisición de señales analógicas, procesamiento de muestras y visualización de registros. En las secciones posteriores se presentan las etapas para la implementación del WAMS, partiendo de describir PMU virtuales, simular la transmisión de información, y programar los concentradores de datos fasoriales (PDC). Todo esto termina disponible a usuarios a través de una interfaz de visualización.

#### SISTEMA DE MONITOREO DE ÁREA AMPLIA EN TIEMPO REAL

Un WAMS es el conjunto de instrumentos-comunicaciones alimentando las aplicaciones con sincrofasores. La tarea inicia con instalar PMU en las subestaciones y transmitir paquetes de datos digitalizados hasta un elemento concentrador. Las arquitecturas de WAMS pueden ser distintas, sea: centralizada, descentralizada o distribuida (Gore y Kande, 2015).

En estas variantes de implementación coinciden en cuanto a la presencia de tres etapas generales:

- a) La primera involucra elementos para coleccionar información a nivel de subestación con las mediciones primarias.
- b) En la segunda participan los sistemas de comunicación enlazados por canales dedicados, en este caso con lenguaje en forma de código.
- c) La tercera etapa contiene el software de las aplicaciones, que en este trabajo lo referimos como PDC y solo se dedica a la visualización de los voltajes nodales y de la potencia activa de una red eléctrica de prueba a escala de laboratorio.

La estructura funcional de los WAMS sin importar su arquitectura se puede dividir para su estudio en tres secciones: adquisición, transmisión y manejo de datos, tal como se ilustra en la Figura 2, donde la comunicación es unidireccional entre las PMU y los PDC locales, y puede ser bidireccional entre estos PDC locales y su PDC central. Para el caso de aplicación que se presenta en esta investigación se escogió una arquitectura de tipo centraliza donde los datos proceden desde las PMU, pasan por un canal de comunicaciones y llegan hasta un único PDC Central en el cual se ordena toda la información recabada mediante las etiquetas de tiempo, el arreglo de esta arquitectura en específico se muestra en la Figura 3, para este caso el flujo de información es unidireccional desde las PMU hasta el PDC central.

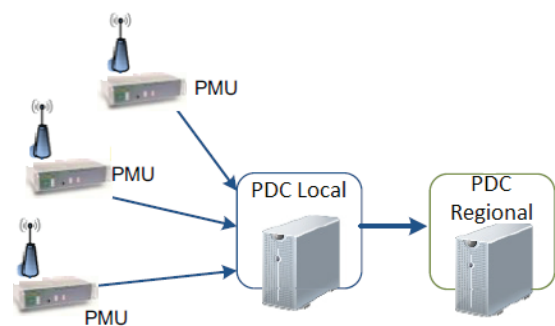


Figura 1. Concentración de registros de Medición Fasorial sincronizada

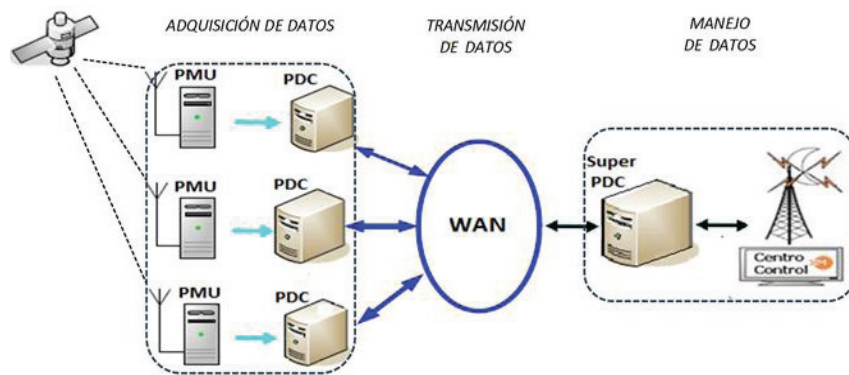


Figura 2. Diagrama estructural de un WAMS

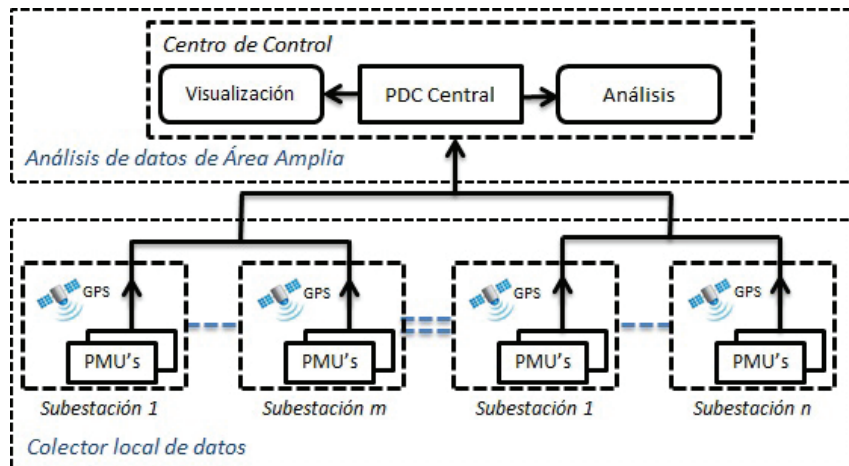


Figura 3. Diagrama funcional de una arquitectura centralizada de WAMS

### ADQUISICIÓN DE DATOS

Las PMU son las encargadas de realizar la adquisición de la información debido a que se encuentran instaladas en plantas de generación y subestaciones, realizan la medición del voltaje nodal y la corriente de línea, entregando su magnitud y ángulo con una estampa de tiempo global; dicha medición puede ser por fase ( $a b c$ ) o por secuencias ( $0 + -$ ) a una velocidad de 10 y hasta 60 paquetes de datos enviados por segundo (IEEE Standard C37.118.1-2011), en este caso se eligió el envío de 20 paquetes de datos.

Para realizar su función las PMU necesitan las mediciones de voltaje provenientes del transformador de potencial (TP) y las de corriente a través del transformador de corriente (TC), estos elementos acondicionan en magnitud la señal analógica que entra al PMU, además un GPS para obtener el dato de etiqueta de tiempo que se agregará a la medición y, por último, un canal de comunicación para el envío de la información. En la Figura 4 se presenta un esquema de este arreglo entre los transductores, el GPS, la PMU y el canal de comunicación.

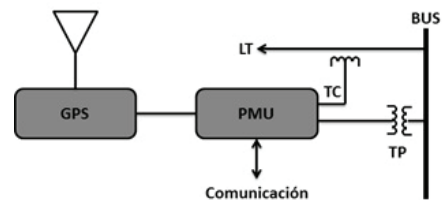


Figura 4. Diagrama de conexión de una PMU

### CONCEPTO DE MEDICIÓN FASORIAL SINCRONIZADA

Actualmente se utiliza un procesamiento digital de señales para poder obtener las variables del SEP en su forma fasorial, que se conforma de diferentes pasos. Primero, un filtro analógico antialiasing se usa para limitar el ancho de banda de la señal de entrada para que sea compatible con la frecuencia seleccionada para la conversión analógica-digital, basado en el Teorema de Nyquist.

A la salida del convertidor analógico-digital se tiene una señal digital con muestras equiespaciadas, en este caso, los datos digitalizados se filtran aplicándoles la Transformada Discreta de Fourier (DFT) para obtener

una señal muestreada en frecuencia (Phadke *et al.*, 1983; 1994).

La representación de la DFT mostrada en (1), se considera que es una señal finita con un periodo de  $2\pi$ , con un intervalo de muestreo de  $2\pi/N$ , una revisión detallada de la formulación se presenta en (Phadke *et al.*, 1983).

$$X = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=1}^N X_k e^{-j2\pi k/N} \quad (1)$$

donde

$N$  = número de muestras

$X_k$  = muestra digital

$X$  = número complejo que representa el fasor

Una vez obtenidos los valores fasoriales de cada fase de voltaje o corriente mediante la DFT, se aplica la transformación de componentes simétricas dada por el Teorema de Fortescue, mostrado en (2), esto para obtener los datos de las secuencias cero, positiva y negativa, de las señales de voltaje y/o corriente.

$$\begin{pmatrix} U^0 \\ U^+ \\ U^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{pmatrix} \quad (2)$$

Hasta este punto se tiene un fasor, ahora se procede a utilizar el dato de tiempo dado por el GPS, el cual se agregará al fasor en el formato IRIG-B para conocer el instante preciso en el que se realizó la medición, la salida de datos con etiqueta de tiempo se le denomina Sincrofasor cumpliendo el IEEE Standard C37.118.1-2011 (2011), presentan en extenso las pruebas de validación que se deben seguir para la implementación de una PMU. La metodología para obtener el Sincrofasor, basado en el procesamiento de señales que se mencionó anteriormente y bajo las condiciones establecidas en IEEE Standard C37.118.1-2011, se ejemplifica con un diagrama de bloques como el que se muestra en la Figura 5.

Las PMU disponibles en el mercado tienen la capacidad de realizar mediciones en tiempo real a una tasa por debajo de los 20ms, su respuesta se da en sub-múltiplos de la frecuencia fundamental del sistema, para una frecuencia de 60Hz, pueden entregar 10, 12, 15, 20, 30 o hasta 60 datos por segundo, tal como se indica en IEEE Standard C37.118.1-2011.

Para este trabajo se implementó un PMU en la plataforma de simulación tiempo real OPAL-RT®, que tiene 16 canales de entrada analógicos para ingreso de señales con una magnitud entre 10V y 20mA; en la implementación se propone un filtro antialiasing basado en una función de Butterworth con una frecuencia de corte de 900Hz, un convertidor analógico-digital con una tasa de muestreo de 0.5ms, lo cual genera 32 muestras por ciclo de frecuencia fundamental de 60Hz, cabe resaltar que se acota la duración del ciclo a 16ms; para la obtención del fasor en el filtrado digital se utiliza una ventana de un ciclo de frecuencia fundamental, la entrega de datos al exterior del dispositivo se considera a una tasa de 20 paquetes por segundo; se calcula un fasor para cada ciclo y solo se envía una tercera parte de la información disponible, para el envío del paquete de datos se considera el promedio de los 3 fasores calculados.

Se presenta en la Figura 6 el registro de las señales adquiridas desde un sistema físico, las cuales solo han pasado por el proceso de atenuación para ingreso a la DAQ, hasta este punto no se le han incluido los procedimientos de filtrado de señal mencionados en párrafos anteriores. Dicho registro concierne a una condición de estado estable, por lo cual no tiene cambios en magnitud o fase para un registro a largo plazo.

Posteriormente, se realiza la tarea de procesamiento de la información contenida en la Figura 6 y con un registro de mayor duración en tiempo; dicho procesamiento tiene como finalidad obtener el fasor correspondiente a la secuencia positiva tanto en magnitud y como ángulo para dicha señal, se muestra en las Figuras 7a y 7b, respectivamente. Esta información se acondicionará en el formato de sincrofasor (Figura 7c), para

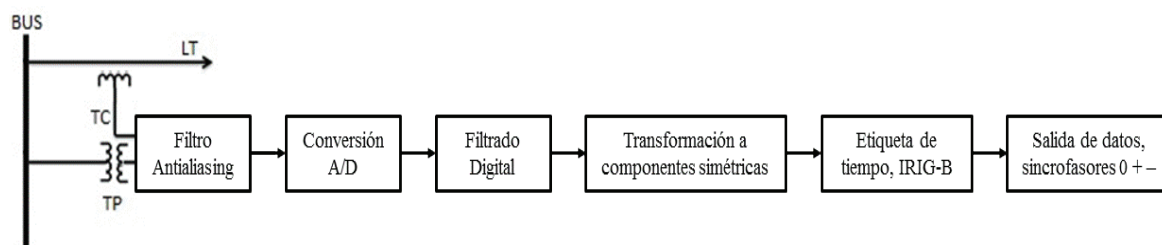


Figura 5. Diagrama de bloques para obtención del sincrofasor

el envío al punto concentrador de información, en dicho formato se presenta la estampa de tiempo referente a la captura de un Sincrofasor específico. Para la Figura 7c la primera fila concierne a la magnitud del fasor de secuencia positiva, la segunda al ángulo de fase de la secuencia positiva, ambos datos obtenidos del procesamiento de la información de la Figura 6 y presentados en la Figura 7a y 7b como un registro de largo plazo. La tercera fila es el año, la cuarta el mes, la quinta la hora, la sexta minutos y la séptima los segundos con una resolución hasta milésimas de segundo.

### TRANSMISIÓN DE DATOS

La transmisión de datos se realiza por canales de comunicación de diversos tipos, no necesariamente a través de internet, y esta comunicación debe cumplir con di-

versos requerimientos, los cuales se han estandarizado y se pueden revisar a detalle en (IEEE Standard C37.118.2-2011).

Entre los requerimientos a revisar se tienen la tasa de envío de datos que para el caso de un sistema con frecuencia de 60Hz puede ser de 10, 12, 15, 20, 30 o 60 paquetes de datos por segundo.

Los protocolos comunes para el envío de dichos paquetes de información son el TCP (Protocolo de Control de Transmisión), UDP (Protocolo de Usuario basado en Datagramas), DNP (Protocolo de Red Distribuida) y IEC810-5 (Comisión Electrotécnica Internacional).

El ancho de banda requerido depende de la cantidad de paquete de datos a enviar. A continuación en la Tabla 1 se presenta la estimación del ancho de banda basado en la Tabla C.1 presentada en la referencia IEEE Standard C37.118.2-2011.

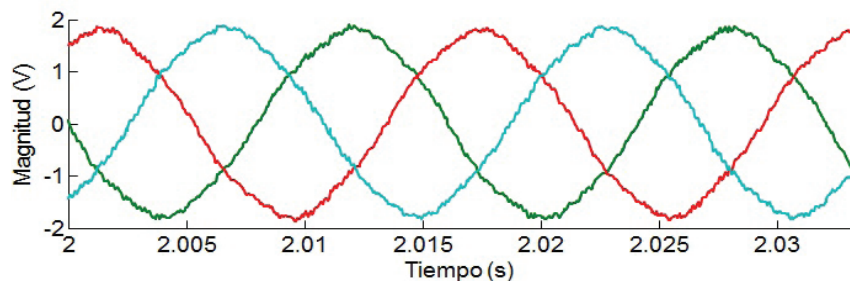


Figura 6. Registro de voltaje trifásico del bus 4 sin procesamiento

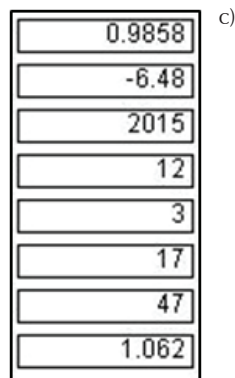
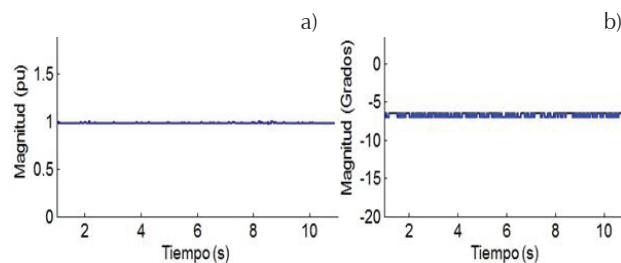


Figura 7. Registro de voltaje del bus 4 con procesamiento para obtención de secuencia positiva, a) Magnitud de voltaje de secuencia positiva, b) Ángulo de fase del voltaje de secuencia positiva y c) Formato de Sincrofasor



Tabla 1. Estimación de los requerimientos de ancho de banda para transmisión de datos desde PMU a PDC

Velocidad de transmisión en bits por segundo (bps), por ejemplo mensajes utilizando UDP / IP sobre Ethernet							
PMU tasa de envío en paquetes por segundo	10	12	15	25	30	50	60
Contenido del mensaje: 2 fasores en números enteros	6720	8064	10800	16800	20160	33600	40320
Contenido del mensaje: 2 fasores en punto flotante	7680	9216	11520	19200	23040	38400	46080
Contenido del mensaje: 12 fasores en números enteros	9920	11904	14880	24800	29760	49600	59520
Contenido del mensaje: 12 fasores, 2 datos analógicos, 2 digitales y todos en números enteros	10560	12762	15840	26400	31680	52800	63360

Por otro lado, en Dengjun (2006) se plantea el proceso de comunicación basado en 3 capas, de las cuales a continuación se presenta una breve reseña:

1. La primera, consiste en las unidades de medición, de conmutación y de control.
2. La segunda, reside en las unidades de comunicación tales como *módems y routers*.
3. La tercera, es el medio de comunicación que puede consistir en fibra óptica, microondas o satélite, teniendo en cuenta el ancho de banda, robustez y el tiempo de retardo del canal.

La transmisión de información produce un retardo o latencia entre el envío y recepción de datos, dicho retardo se caracteriza para algunos canales, como lo presentan en Naduvathuparambil *et al.* (2002), entre los que tenemos: Cables de fibra óptica y señales microondas de 100–150ms, onda portadora por línea de alta tensión de 150–350ms, línea telefónica de 200–300ms y vía Satélite 500–700ms.

Para el presente trabajo se incluyó un retardo lineal por retención de muestras en la transmisión de información entre las PMU y el PDC, dicho retardo se establece en un rango aleatorio de 100–150ms debido a que se considera una transmisión por fibra óptica solo teniendo en cuenta que sea un múltiplo de la adquisición de datos de la plataforma de simulación, en este caso 50µs.

### MANEJO DE DATOS

Esta función dentro del WAMS se complementa por el Concentrador de Datos Fasoriales (PDC), que incluye: colector de datos, filtrado de datos repetidos, procesamiento de datos y re-transmisión de los datos recabados.

El PDC debe tener la habilidad de tolerar datos de mala calidad e incluso errores o pérdidas de la red de transmisión de información, lo que puede ser desde un nodo o de diferentes. Puede además realizar funciones

como la de registrador de disturbios, estimador de estados, identificación de parámetros, entre otras (Buttayak *et al.*, 2012).

El concentrador de datos usualmente consiste en tres partes: plataforma de recepción de datos, registro de datos históricos e interfaz gráfica para visualización de información (IEEE Standard C37.244-.2013).

### CONCENTRADOR DE DATOS FASORIALES (PDC)

Un PDC consiste en 3 partes, las cuales se describen en IEEE Standard C37.244-.2013, y se pueden resumir bajo la siguiente propuesta: la primera es la unidad central que consta de una computadora que recibe y colecta los datos desde las PMU, donde el software de aplicación en el PDC se encarga de administrar los datos, esto es, el acomodo de los mismos basados en sus etiquetas de tiempo, la Figura 8 muestra el esquema de esta unidad central y su función. La segunda es el almacenamiento de datos, donde la computadora captura los datos y los almacena. La tercera es una Interfaz Humano-Maquina (HMI), que tiene la función de una unidad de monitoreo y control de todo el sistema, en este caso denominada Interfaz Gráfica de Usuario (GUI).

El WAMS virtual termina como una rutina programada en ambiente MATLAB-Simulink®. Esa rutina se codifica para ejecución sobre la plataforma de simulación OPAL-RT®. Se recibe en el subsistema de entradas digitales las muestras de diferentes PMU. El PDC permite manejar una tasa de transmisión configurable y entonces con fines de aumentar la velocidad respecto al SCADA, el diseño de WAMS maneja 20 paquetes de datos por segundo. En la Figura 8, se ejemplifica el proceso de reordenación de paquetes, con transmisiones desde PMU (etiqueta de espacio) y el valor de estos PMU alineado, respecto a una referencia común (etiqueta de tiempo). La aplicación recoge los valores sincronizados como una estructura matricial y el retraso acumulado en el ordenamiento de muestras es mínimo.

En el caso de que la matriz se llene (pase el tiempo correspondiente a las 10 muestras esperadas, 0.5s) y no

encuentre todas las mediciones del instante de tiempo indicado, este arroja los datos encontrados sin importar que no estén completos, no realiza ningún proceso para rellenar información faltante, debido a que esta ausencia no modifica el resto de valores encontrados y se declara la ausencia de información de dicho nodo o nodos del sistema.

#### INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO

La GUI fue diseñada en LabView®, se creó un sistema de visualización que se enlazó con los datos de salida de la implementación MATLAB-Simulink® de la plataforma OPAL-RT® y su software dedicado RT-LAB® y TestDrive®, esto debido a que la implementación realizada se ejecuta en tiempo real y no es posible que el software que realiza los cálculos (MATLAB-Simulink®) provea directamente de información al software de visualización (LabView®). Este proceso y las actividades de cada etapa se plantean de forma esquemática en la Figura 9.

Las variables medidas y propuestas mostradas en la GUI son la magnitud de los voltajes nodales de secuencia positiva en formato  $pu$ , ángulos de transferencia de potencia, magnitudes de potencia activa, señales trifásicas de voltaje sin procesar, así como algunas alarmas visuales para señalar la violación de magnitudes de voltaje o pérdida de información.

En la Figura 10a se muestra la interfaz programada en este trabajo para usar como visualizador de los datos medidos por las PMU y procesados por el PDC, además se aprovecha la plataforma para enviar los datos crudos, esto es, sin procesamiento para revisar la distorsión que pueden tener las formas de onda ante algunos escenarios operativos, la cual se visualiza en la caratula de la Figura 10b.

#### CASO DE ESTUDIO

Para probar el WAMS propuesto se puede utilizar tanto una red de prueba virtual implementada en ambiente Matlab-Simulink® como desde dispositivos físicos,

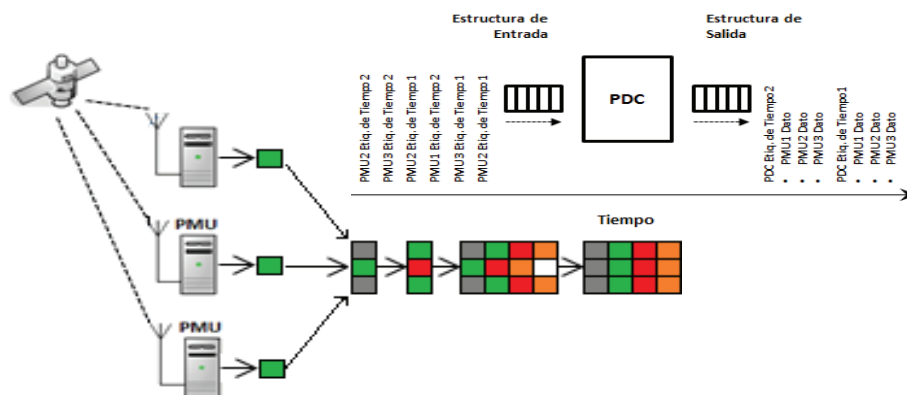


Figura 8. Estructura de entrega de datos de la Unidad Central del PDC

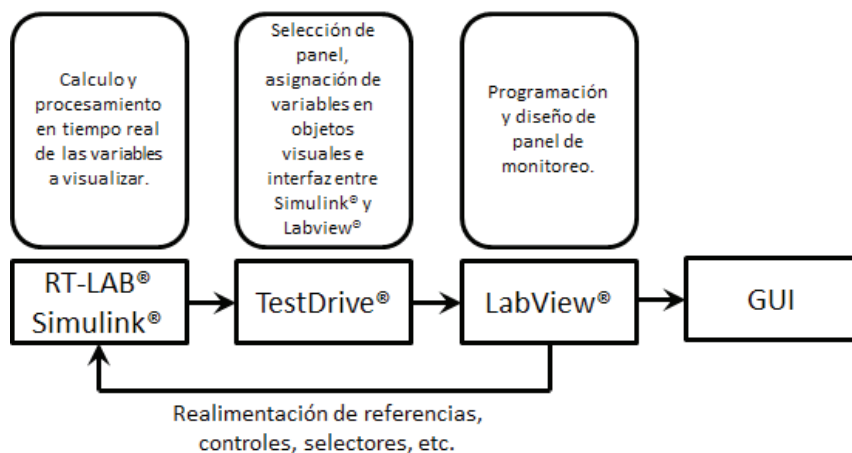


Figura 9. Desarrollo de interfaz de visualización del WAMS

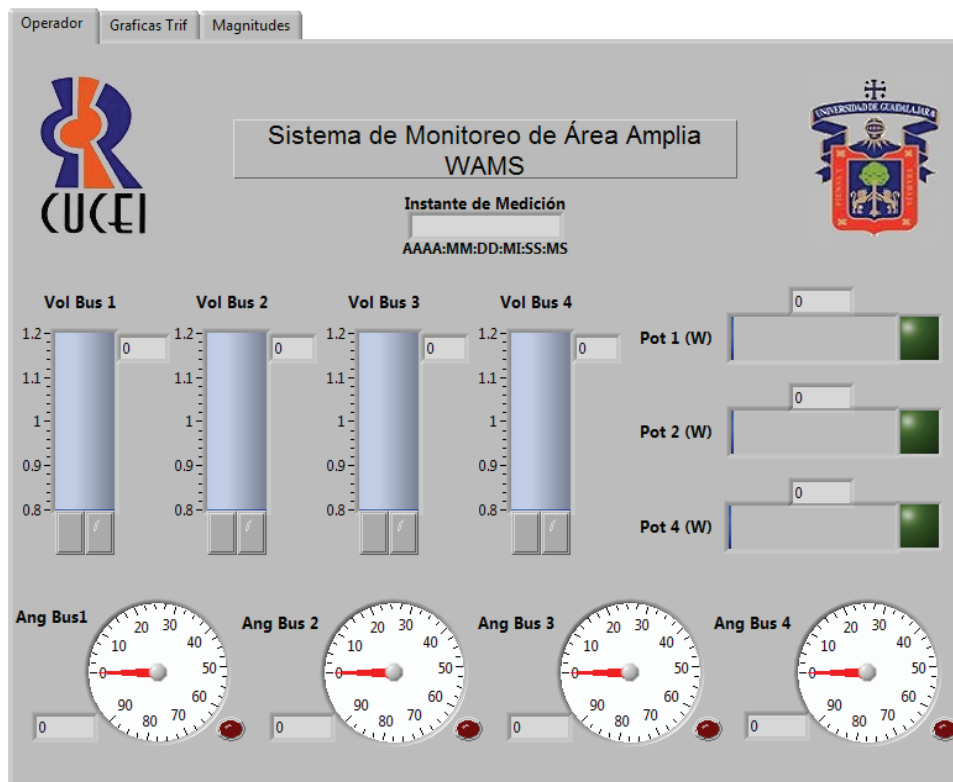


Figura. 10a. Carátula de visualización del WAMS

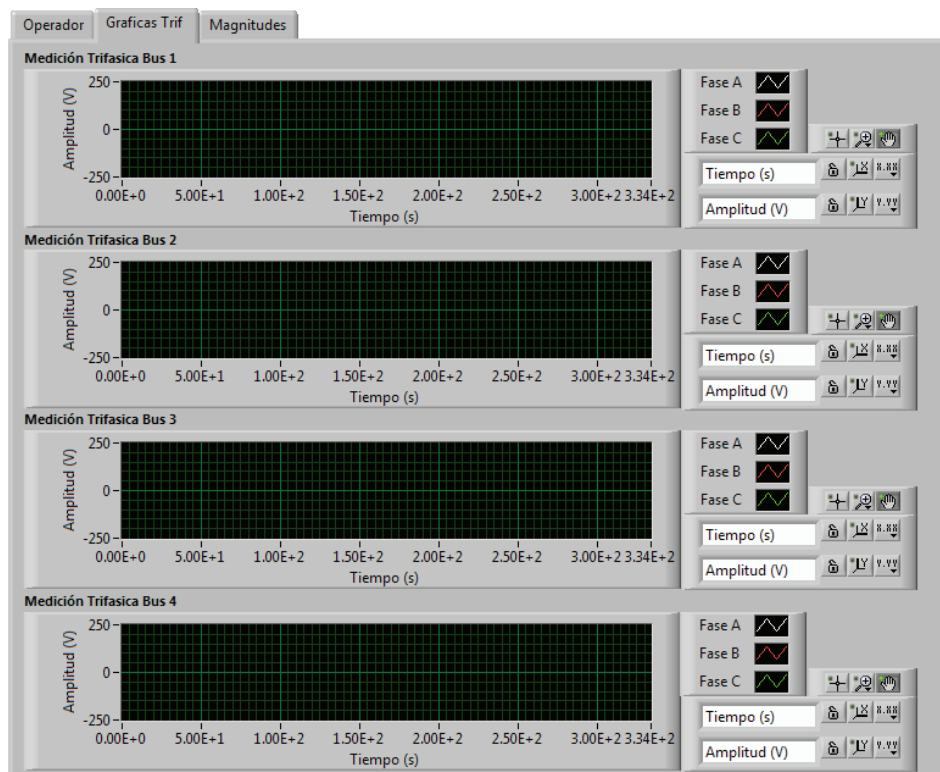


Figura 10b. Carátula de visualización del WAMS



siempre y cuando dichas señales analógicas hayan pasado por un proceso de atenuación para su ingreso a la plataforma de adquisición de señales con que se cuente, en este caso, la del simulador en tiempo real OPAL-RT®.

En este caso para el desarrollo de pruebas se empleó una red física a escala de laboratorio, la cual cuenta con 4 buses: 1 de carga, 1 de generación y 2 de maniobra, como se muestra en la Figura 11. Cabe mencionar que en este caso de estudio se utilizó una red física, sin embargo, el sistema funciona tanto con redes físicas y señales reales como con redes simuladas.

Para obtener la generación se utilizó el suministro de energía eléctrica de CFE, 220V de línea a línea, las líneas de transmisión son un modelo representativo de una línea corta donde solo considera el efecto resistivo y el inductivo propio, la carga es un motor trifásico de 1/4HP. Se monitorean los voltajes de todos los buses, y las corrientes de línea en B1, B2 y B4.

La Figura 12 presenta un esquema de las etapas desarrolladas para probar el WAMS propuesto, el cual consiste en tener el sistema que genera las señales, en este caso la red de prueba mostrada en la Figura 11 y descrita con anterioridad. Como atenuadores se cuenta con TC y TP que reducen las señales a valores de  $\pm 20\text{mA}$  y  $\pm 10\text{V}$ , los cuales se ingresan por las tarjetas de adquisición de datos (DAQ) para su uso en la plataforma OPAL-RT®, donde se obtendrán señales de forma digital a un tiempo de muestreo de  $50\text{ }\mu\text{s}$ , este sistema utiliza el software RT-LAB® para el control de la adquisición de datos y es un enlace para desarrollo en MATLAB-Simulink® donde se implementó el WAMS.

Para validar la implementación realizada de WAMS se utilizará la plataforma de adquisición de datos que acompaña al motor, la cual consiste en TP MI053 de la

marca PICO® con una relación de transformación de 100:1, TC TA018 de la misma marca, con una relación de transformación de 100:1 o de 10:1 con selector manual, una DAQ con un tiempo de muestreo máximo de  $2.5\text{ }\mu\text{s}$  con 8 canales con su propia interfaz gráfica para visualizar los resultados. La prueba propuesta para validación se basa en el aumento de la carga del motor mediante un acoplamiento con un electrodinamómetro, se van a monitorear los cuatro nodos en el modelo de red a escala de laboratorio (Figura 11), no se consideran cambios topológicos durante la prueba, se va a comparar el registro del nodo B4 (Potencia Activa, Reactiva y Aparente) contra el realizado por la plataforma propia de monitoreo del motor, además de mostrar los datos medidos de voltaje de secuencia positiva y la potencia activa de los cuatro nodos en la carátula de visualización.

## RESULTADOS

Al inicio de la prueba el motor se encuentra sin carga, esto es en vacío, con lo cual su potencia activa es baja comparada con la reactiva; se procede a aplicar carga a la flecha del motor por medio del electrodinamómetro, la carga provocó un aumento de la potencia activa y disminución de la reactiva al mejorar el factor de potencia por efecto de carga, al retirarse la carga el motor regresa a su condición de vacío; este comportamiento se puede observar en la Figura 13a y 13b.

En el primer caso, la Figura 13a presenta el registro con el sistema de monitoreo propuesto en este trabajo, donde para su mejor visualización los valores manejados en *pu* se les aplica la conversión para regresarlos a valores reales; aunque en el segundo caso el sistema de

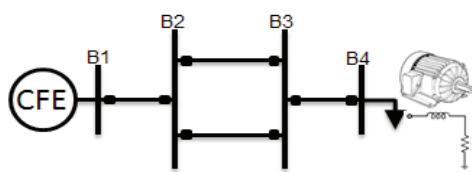


Figura 11. Sistema de prueba

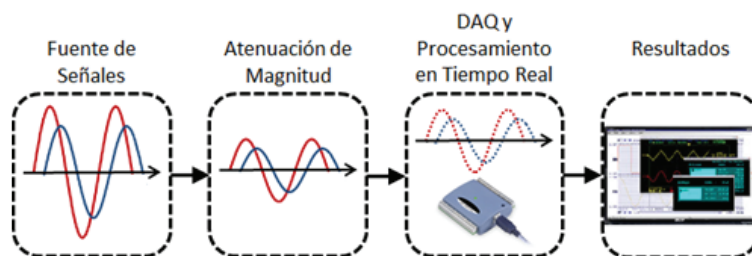
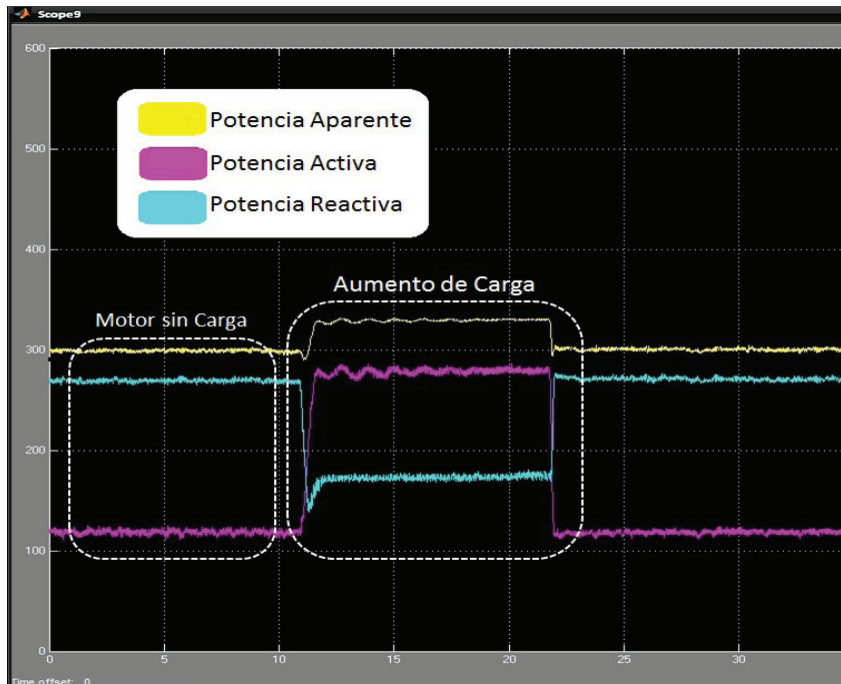


Figura 12. Esquema para adquisición de datos

adquisición de datos y monitoreo propio del motor (Figura 13b), los muestra en *pu* con una base de 1000 a 1 dado por la relación de sus TP y TC. Al comparar los resultados obtenidos en las Figuras 13a y 13b se puede notar que la propuesta de monitoreo aquí realizada permite registrar cambios de manera más rápida y visualizar estados de transición con mayor detalle a pesar de contar con una DAQ de velocidad menor ( $50\mu\text{s}$  contra la de  $2.5\mu\text{s}$ ).

Esta prueba permite validar el comportamiento del WAMS propuesto debido a que el registro de potencia calculado con base en las mediciones de voltaje y corriente en los nodos desde la red física a escala de laboratorio y los valores adquiridos de la plataforma de monitoreo del motor que se utiliza como equipo de prueba, aportan el mismo comportamiento y valores numéricos, solo considerando las bases propias de sistema por unidad.



a)



b)

Figura 13. Grafica de potencia medida en el Bus 4 y en el motor,  
a) Registro del WAMS propuesto y  
b) Registro del sistema propio del motor

Las mediciones realizadas con el sistema físico pasan un proceso de atenuación de magnitud, posteriormente un procesamiento de señal para calcular el fasor correspondiente, el cual incluye la etiqueta de tiempo en que se tomó la medición, esto con el fin de cumplir los requisitos de un Sincrofasor, además se procede a realizar la colección de datos en un punto concentrador el cual organiza la información con base en la etiqueta de tiempo de los mismos, como se muestra en la Figura 14a, una vez ordenados se desarrollan rutinas como el cálculo de potencia que se empleó en este caso, también es posible alimentar la carátula de visualización para el operador como se muestra en la Figura 14b. Dentro de la misma carátula se incluyeron señales visuales de alarma por violaciones de nivel de voltaje nodal, y es posible incluir un mayor número de alarmas que involucren otros parámetros, la restricción es tener el dato medido o que se pueda calcular directamente usando el valor de voltaje y corriente en su forma fasorial.

## CONCLUSIONES

Se desarrolló en plataforma de simulación tiempo real una Unidad de Medición Fasorial (PMU) que cumple con el estándar de IEEE y que puede tener como datos de entrada señales virtuales de simulación o señales analógicas provenientes de un dispositivo físico.

Se realizó la implementación de un Concentrador de Datos Fasoriales (PDC) que procesa la información enviada desde diversas PMU con base en la etiqueta de tiempo de los datos, el envío de los paquetes de datos incluye un retraso lineal en el canal de comunicación, lo que ayuda a probar la confiabilidad del PDC al realizar la búsqueda y acomodo de información.

Se desarrollan rutinas de cálculo de potencia activa, reactiva y aparente con la información disponible en el PDC, además se desarrolla una carátula de visualización para facilitar el proceso de monitoreo.

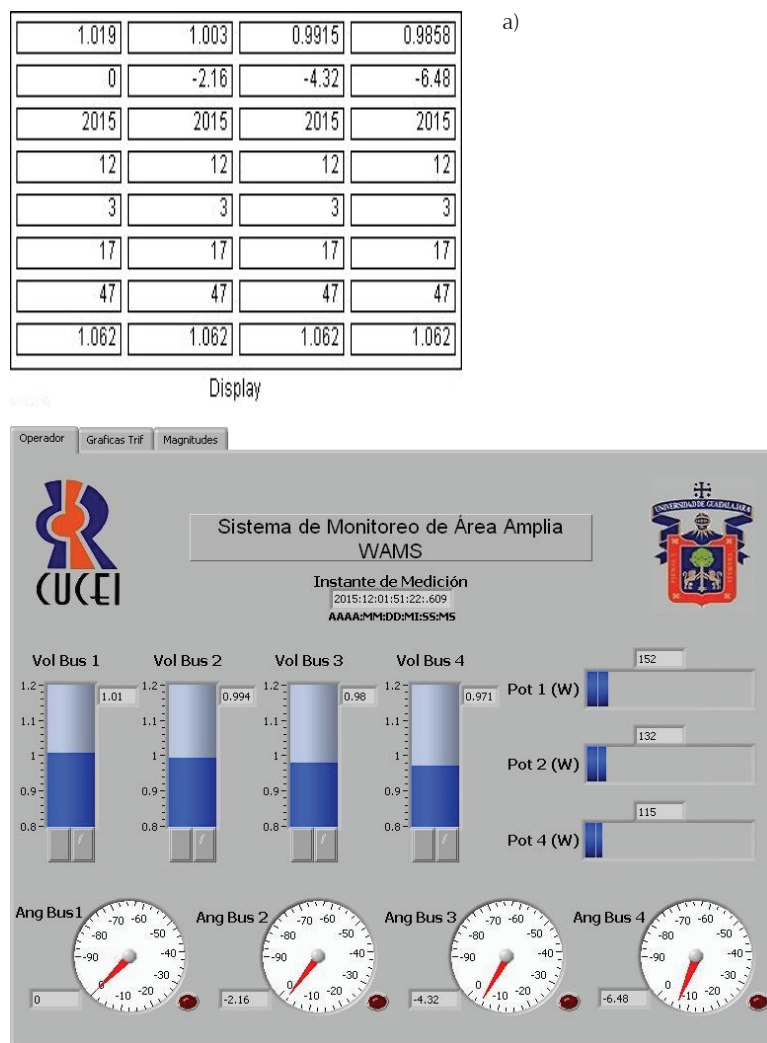


Figura 14. Datos concentrados en el WAMS y su visualización, a) Matriz de datos del PDC y b) Carátula de visualización para operador

Se validó la implementación de un Sistema de Monitoreo de Área Amplia (WAMS) a escala de laboratorio usando mediciones reales y comparando contra un sistema de adquisición de señales propio del dispositivo probado. Aunque se empleó un sistema de cuatro nodos, es posible realizar este procedimiento incluyendo un mayor número de nodos y no restringiéndose a que sean solo señales virtuales o reales.

### AGRADECIMIENTOS

Se agradece al CONACYT por la beca 370168 para los estudios de maestría de Apodaca-Zamora Federico con Núm. de registro 300750 y CVU 550732. Se agradece al CONACYT por la beca 377213 para los estudios de doctorado de López de Alba Carlos Alberto, con Núm. de registro 238053 y CVU 256222.

### REFERENCIAS

- Anjia M., Jiayi Y., Zhizhong G. PMU Placement and Data Processing in WAMS that Complements SCADA. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, volumen ol. 1, junio de 20005: 780-783.
- Buttayak S., Wornpuen A., Promparn N., Charbkaew N., Bunyagul T. Design of phasor data concentrator for phasor monitoring system, *IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology*, 2012.
- De la Ree J., Centeno V., Thorp S.J., Phadke A.G. Synchronized phasor measurement applications in power systems. *IEEE Transactions in Smart Grid*, volumen 1 (número 1), abril de 2010: 20-27.
- Dengjun Y. Wide-Area protection and control system with WAMS based, *International Conference on Power System Technology*, 2006.
- Gaushell D.J. y Darlington H.T. Supervisory control and data acquisition. *Proceedings of the IEEE*, volumen 75 (número 12), diciembre de 1987: 1645-1658.
- Gore R. y Kande M. Analysis of wide area monitoring system architecture. *IEEE International Conference on Industrial Technology*, marzo de 2015: 1269-1274.
- IEEE Std C37.118.2-2011. IEEE Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power Systems. Diciembre 2011.
- IEEE Standard C37.118.1-2011. IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power System. Diciembre de 2011.
- IEEE Std C37.244-2013. IEEE Guide for Phasor Data Concentrator Requirements for Power System, 2013.
- Kenneth E.M. Synchrophasor standards and guides for the smart grid. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, julio de 2013: 1-5.
- Naduvathuparambil B., Valenti M.C., Feliachi A. Communication delays in wide area measurement systems, *Proceedings of the Thirty-Fourth Southeastern Symposium on System Theory*, 2002, pp.118-122.
- Phadke A.G., Thorp J.S., Karimi K.J. State estimation with phasor measurements. *IEEE Transactions on Power Systems*, volumen 1 (numero 1), febrero de 1986: 233-238.
- Phadke A.G. Synchronized phasor measurements a historical overview. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific*, volumen 1, octubre de 2002: 476-479.
- Phadke A.G. y De Moraes R.M. The wide world of wide-area measurement. *IEEE Power and Energy Magazine*, volumen 6, (número 5), septiembre-octubre de 2008: 52-65.
- Phadke A.G., Thorp J.S., Adamiak M.G. A new measurement technique for tracking voltage phasor, local system frequency, and rate of change of frequency. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, volumen PAS-102 (número 5), mayo de 1983: 1025-1038.
- Phadke A.G., Pickett B., Adamiak M., Begovic M., Benmouyal G., Burnett Jr., R.O., Cease T.W., Goossens J., Hansen D.J., Kezunovic M., Mankoff L.L., McLaren P.G., Michel G., Murphy R.J., Nordstrom J., Sachdev M.S., Smith M.S., Thorp J.S., Trottingnon M., Wang T.C., Xavier M.A. Synchronized sampling and phasor measurement for relaying and control. *IEEE Transactions on Power Delivery*, volumen 9 (número 1), enero de 1994: 442-452.
- Schweppe C.F. y Wildes J. Power system static-state estimation, Part I, Exact model. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, volumen PAS-89 (número 1), enero de 1970: 120-125.

### Citación sugerida:

#### Citación estilo Chicago

López-De Alba, Carlos Alberto, Federico Apodaca-Zamora, Víctor Hugo Ortiz-Muro. Implementación de un sistema de monitoreo de área amplia a escala de laboratorio para sistemas eléctricos de potencia. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XIX, 02 (2018): 195-207.

#### Citación estilo ISO 690

López-De Alba C.A., Apodaca-Zamora F., Ortiz-Muro V.H. Implementación de un sistema de monitoreo de área amplia a escala de laboratorio para sistemas eléctricos de potencia. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, volumen XIX (número 2), abril-junio 2018: 195-207.

### SEMBLANZAS DE LOS AUTORES

*Carlos Alberto López-De Alba.* Recibió su grado de ingeniero mecánico electricista y maestro en ciencias en ingeniería eléctrica por la Universidad de Guadalajara en 2009 y 2012, respectivamente. Actualmente es estudiante de doctorado en ciencias de la electrónica y la computación en la misma Universidad. Realiza actividades como profesor de asignatura en el Departamento de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad de Guadalajara. Su área de interés es el monitoreo, control y protección de área amplia en Sistemas de Potencia.

*Federico Apodaca-Zamora.* Recibió su grado como ingeniero en mecatrónica por la Universidad Politécnica de Sinaloa en 2012 y de maestro en ciencias en ingeniería eléctrica por la Universidad de Guadalajara en enero de 2016. Actualmente se encuentra laborando como analista en el Centro Nacional de Control Eléctrico Occidental. Su área de interés está en el campo del monitoreo de área amplia de sistemas de potencia.

*Victor Hugo Ortiz-Muro.* Recibió su grado como ingeniero mecánico electricista y maestro en ciencias en ingeniería eléctrica por la Universidad de Guadalajara en 1995 y 1998, respectivamente. Asimismo el grado de doctor en ciencias de la Universidad Autónoma de Nuevo León en 2004. Actualmente es profesor investigador en el Departamento de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad de Guadalajara. Su área de interés se encuentra en el campo de protecciones digitales a sistemas de potencia y simulación en tiempo real.