



REVISTA INGENIO

Simulación Sincrofasorial con PMUs Virtuales en Sistema de Potencia Para Estudios Fuera de Línea

Synchrophasor Simulation With Virtual PMUs in Power System for Off-Line Studies

Armando Salvador Freire Freire |  Universidad Técnica de Cotopaxi -Ecuador

Fernando Rafael Arias Atiaja |  Universidad Técnica de Cotopaxi -Ecuador

Jennifer Nicole Bustos Arias |  Universidad Técnica de Cotopaxi -Ecuador

Recibido: 25/4/2025

Recibido tras revisión: 1/5/2025

Aceptado: 20/5/2025

Publicado: 10/7/2025

PALABRAS CLAVE

WAMs, PMUs, Monitoreo dinámico, DIgSILENT PowerFactory, Python.

RESUMEN

Uno de los principales componentes que conforman el sistema de monitoreo de área extendida (WAMs) son las Unidades de Medición Fasorial (PMUs), dispositivos que permiten realizar análisis dinámico en el estado del sistema eléctrico. Estos equipos permiten la estimación de fasor representando las magnitudes de ángulos de tensión e intensidad y garantizando, mediante la sincronización temporal y frecuencia de muestreo, visualizar al sistema en tiempo real y comparar fasores medidos en distintos puntos de la red. Este estudio presenta una plataforma de monitoreo dinámico con PMUs para un sistema de potencia de dos áreas, el enfoque comienza con el desarrollo y verificación de un modelo de referencia ejemplo 12.6 (P. Kundur, Power system stability and control), simulado en el software de DIgSILENT PowerFactory, luego se realiza un estudio dinámico mediante la implementación de eventos de perturbación con la finalidad de extraer datos de voltajes y corrientes en magnitud y ángulo, además, se implementa un algoritmo mediante el software Python que sirve de PMU virtual para la lectura y envío de datos registrados mediante una red ip ficticia que será extraída por el software Pyscript para la visualización y uso de datos para su monitoreo, también se muestra el monitoreo dinámico sincrofasorial mediante el software PMU Connection Tester que se comunica por medio de la ip virtual enviada desde Python, como resultado se obtiene la gráfica de respuesta mediante la visualización de ángulos de PMUs virtuales.

KEY WORDS

WAMs, PMUs, Dynamic Monitoring, DIgSILENT PowerFactory, Python.

ABSTRACT

One of the main components that make up the wide area monitoring system (WAMs) are the Phasor Measurement Units (PMUs), devices that allow dynamic analysis of the state of the electrical system, these devices allow phasor estimation representing the magnitudes of voltage and current angles and guaranteeing by means of time synchronization and sampling frequency to visualize the system in real time and compare phasors measured at different points of the network. This study presents a dynamic monitoring platform with PMUs for a two-area power system, the approach starts with the development and verification of a reference model example 12.6 (P. Kundur, Power system stability and control), simulated in DIgSILENT PowerFactory software, then a dynamic study is performed by implementing disturbance events in order to extract data of voltages and currents in magnitude and angle, in addition, an algorithm is implemented using Python software that serves as a virtual PMU for reading and sending data recorded through a fictitious ip network that will be extracted by the Pyscript software for viewing and use of data for monitoring, also shows the dynamic monitoring synchrophasor by PMU Connection Tester software that communicates through the virtual ip sent from Python, as a result the response graph is obtained by displaying angles of virtual PMUs.

1. INTRODUCCIÓN

Los grandes apagones eléctricos que han causado pérdidas económicas millonarias en diversas partes del mundo, propiciaron la necesidad de realizar un análisis dinámico y en tiempo real del estado del sistema de potencia [1].

El objetivo de los WAMs es mejorar el control y monitoreo en tiempo real de los sistemas eléctricos de potencia (SEP), proporcionando datos a través de las Unidades de Medición Fasorial (PMUs). Estas unidades permiten un muestreo sincronizado y una actualización de datos a altas velocidades, mediante la estimación fasorial de

la frecuencia, magnitud y ángulo de fase de los componentes de voltaje y corriente. Esto se logra gracias a la sincronización temporal y la alta frecuencia de muestreo en tiempo real dentro del sistema eléctrico. Así, los sistemas WAMs en operación, junto con el sistema de posicionamiento global (GPS), facilitan la supervisión de los sistemas de energía bajo el mismo marco de referencia de tiempo, con una precisión de 1 ms [2].

Los dispositivos PMUs monitorizan, protegen y controlan el estado del sistema eléctrico, manejan una fuente mediante señales de tiempo GPS para adquirir información precisa de la red generando datos fasoriales en espacios separados por miles de kilómetros [3], la sincronización del tiempo, la alta precisión y su velocidad de respuesta hacen de que estos equipos sean oportunos tanto para el control y protección en tiempo real, como para el monitoreo global en estado estable y dinámico del sistema [4]. Estas unidades se encuentran conectados a un concentrador de datos fasoriales (PDC) para obtener observabilidad en un sistema de monitoreo de área amplia, así como para el monitoreo dinámico.

Dada la importancia que tiene la supervisión confiable del sistema, nuevos desafíos numéricos y algoritmos matemáticos se han estudiado y mejorado durante décadas, la creciente penetración de PMUs al sistema de transmisión introdujo un potencial de mejoras como la observabilidad al estimador de estado (SE) y las aplicaciones que permite la Evaluación de Seguridad Dinámica (DSA), aportando así información precisa a la toma de decisiones, a partir de ello se instalaron PMUs en líneas de transmisión de redes eléctricas en todo el mundo, volviendo una acción imperativa para avanzar en una red más inteligente [5], [6].

Pero, el desarrollo gradual y la complejidad operacional ha generado interés por la Sistema de Evaluación Dinámica de seguridad (DSA), que determina la capacidad en un sistema de potencia para sobrevivir a contingencias o perturbaciones imprevistas que podrían causar la violación de límites de seguridad dentro del sistema potencia. Los operadores de la red ante eventos inesperados muestran problemas para establecer el estado exacto del sistema eléctrico. Un sistema con grado de inseguridad conduce a la propagación de fallas afectando la dinámica del sistema que necesita de una acción de control vertiginosa para evitar situaciones críticas que puedan ocasionar inestabilidad o llegar al colapso total del sistema eléctrico de potencia [7], [8] implementation of power system dynamic security assessment (DSA).

Se ha identificado la necesidad de desarrollar una plataforma de simulación de estudio fuera de línea porque las nuevas tecnologías presentan desafíos significativos en términos de adaptación y conocimiento especializado para los operadores del sistema. Según [9] en el análisis de sistemas fuera de línea, los modelos se consideran probabilísticos para contingencias o condiciones operativas de

la red. Su evaluación se realiza tanto en estado estacionario (SSA) como en estado dinámico (DSA). Este método de evaluación convencional, debido a la gran dificultad en su modelado, es inviable para su aplicación en tiempo real. Sin embargo, resulta adecuado para tareas como la planificación del sistema a largo plazo, ya que en este modo no se requiere una respuesta instantánea para evitar eventos críticos [10].

La intención de este trabajo se ve reflejado a través de las exigencias que presentan los sistemas eléctricos para operadores del sistema, donde las simulaciones van variando a la velocidad del cambio de la realidad, por lo que se determina la importancia de poseer plataformas necesarias de monitoreo dinámico implementadas con herramientas de software open source, que de un programa de simulación como DIgSILENT PowerFactory transmita información a diferentes programas o herramientas computacionales como Python, y de esta forma permita realizar similares funciones a las realizadas en programas principales, con el propósito de dotar una herramienta de entrenamiento offline y capacitación [11].

El objetivo es desarrollar una simulación digital en tiempo fuera de línea (modo estudio) mediante la integración de un software de simulación de sistemas eléctricos de potencia donde extraiga información fasorial de simulación en el dominio del tiempo de la red de dos áreas modelada en Power Factory DIgSILENT y se envíe mediante un script desarrollado en el lenguaje Python que haga la función de PMU virtual y esta información sea recibida mediante otro script en PyScripter que haga la función de PDC, donde se identifique una aplicación de diferencia angular, para crear una conciencia situacional de sistema eléctrico y establecer posteriormente medidas de protección y control.

1.1. FUNDAMENTO TEÓRICO

Los sistemas de gestión de la energía (EMS) se hallan basados en estimadores de estado, teniendo en cuenta la importancia de este campo se hace un estudio de los adelantos conseguidos hasta la presente y las limitaciones existentes, por lo que se analiza las unidades de medición fasorial y tecnologías implicadas con la Norma IEEE C37.118.

1.2. ESTADO DEL ARTE

En la revisión de la normativa para sincrofasones, la primera norma establecida para los sistemas WAMs fue la IEEE 1344-1995, que introdujo los conceptos básicos para la medición sincronizada [12]. Esta norma fue posteriormente reemplazada por la IEEE C37.118-2005, la cual define la medición de fasores sincronizados utilizados en aplicaciones de sistemas de potencia, también define un protocolo de comunicación de datos, no se

abordó el monitoreo dinámico [13], hasta que aparece la IEEE C37.118.1-2011, de carácter informativo que establece la medición de sincrofases para sistemas de potencia y define la medición de frecuencia, sincrofatorial y ROCOF [14]frequency, and rate of change of frequency (ROCOF, y la C37.118.2-2011 que establece la norma de transferencia de datos de sincrofases; en la IEEE C37.118.1aTM-2014 en su enmienda modifica algunos requisitos de rendimiento y actualizaciones para corregir incoherencias introducidas por IEEE Std C37.118.1-2011 [15]and Table 11 (formerly Table 12, mediante la IEC/IEEE 60255-118-1:2018 describe requisitos de marca de tiempo y sincronización para mediciones y establece métodos para evaluar las mediciones de sincrofases para sistemas de potencia, requisitos para cumplir la norma en condición estática y dinámica.

La literatura muestra que [16] desarrolla e implementa en el centro de control de potencia de la compañía eléctrica de Chubu (Japón) una simulación dinámica para formación de despachadores, donde muestra interés tanto en la modelación, algoritmos de simulación y técnicas del software, ofreciendo a sus alumnos una simulación realista. En Irlanda de Norte [17] ejecuta una simulación en Python PSS/E que ofrece una excelente interface donde se genera gran cantidad de datos y evalúa las WAMs basadas en datos arrojados por PMUs, donde se encuentra la red de distribución acoplada a generación distribuida, concluyen que el control y la seguridad de la red a largo plazo mejora, mientras que a corto plazo se implementa una monitorización y modelado preciso del sistema.

En Tokyo [18] se desarrolla un simulador para entrenamiento de la operación de sistemas de energía que reproduzcan fenómenos eléctricos, ya que uno de los objetivos es mejorar la capacidad de adaptación de los operadores ante contingencias complicadas o catástrofes, también para el estudio de casos de gestión de riesgos en la operación diaria, lo que contribuye al suministro seguro y estable. En Suecia [19] se elabora una simulación en Simulink para modelos de control de alto nivel en sistemas de red VSC-HVDC para lo que realiza simulaciones tanto fuera de línea como en tiempo real para varios escenarios de prueba e indica que este modelado muestra la importancia para mejorar el control de la tensión de CC durante los fallos.

En Ecuador [20], indica que el Centro de Control del Operador Nacional de Electricidad (CENACE), para obtener una estimación del Sistema Nacional Interconectado (SNI), emplea un estimador de estado que proporciona resultados en formato tabular, debido a la falta de herramientas que permitan supervisar el ángulo en tiempo real. En [21], describe los principales componentes del sistema WAMs y en base al análisis establece elementos de estrategias para el diseño e implementación del sistema WAMs en el SNI del Ecuador y afirma que mediante los análisis posoperativos ha sido posible identificar el estado

dinámico del sistema. Mientras [22], presenta la aplicación de herramientas de software libre entre otros, el lenguaje de programación Python y asegura ampliamente sus aplicaciones eficientes para análisis numéricos y aplicación en ciencias e ingenierías. En [23] se implementa un prototipo de PMU con el uso de la arquitectura RIO y el software (labVIEW) con el objetivo de proteger, monitorear y controlar el sistema eléctrico ya que cuenta con sistema de monitoreo en tiempo real, permitiendo controlar la inestabilidad de voltaje del sistema frente a contingencias. Mientras en el año 2016 en [24], se establece la regulación sobre requerimientos para la supervisión y control en tiempo real del Sistema Nacional Interconectado (SNI), además de determinar responsables al Sistema Eléctrico Ecuatoriano (SEE) y al Operador Nacional de Electricidad (CENACE).

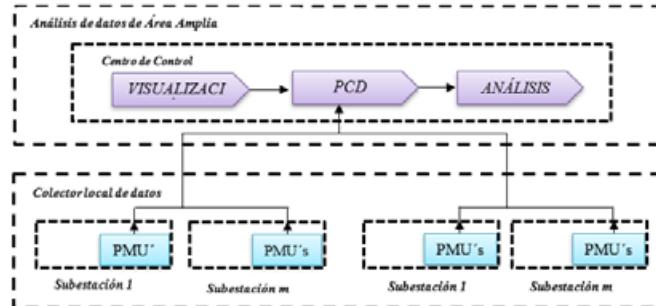
En [25] es por ello que cada sistema eléctrico requiere de estudios y evaluaciones propias que permitan conocer su dinámica operativa y establecer índices o límites de seguridad con el fin prevenir colapsos totales o parciales.\r Este documento presenta una Metodología para Identificar límites seguros de diferencia angular en un sistema eléctrico de potencia conocidos también como límites de estabilidad estática de ángulo. Para la elaboración de este trabajo se resalta el uso de herramientas tecnológicas modernas de monitoreo y análisis de sistemas de potencia, como el Sistema de Monitoreo de Área extendida (WAMS se presenta una metodología para identificar límites de estabilidad estática de ángulo en el sistema eléctrico basándose en mediciones sincrofatoriales, conjuntamente con la técnica de minería de datos que permitió alertar al operador ante posibles problemas de estabilidad estática y con ello crear conciencia operativa del suministro de energía eléctrica. En [26] se implementa un hardware y un software para sistemas de control que utiliza una tarjeta F28379D de la serie C2000 de TI mediante la interfaz de la plataforma LabVIEW finalmente realiza pruebas convencionales para validar las mediciones realizadas por PMUs de acuerdo a la norma IEEE C37.118.1. En [11] se desarrolla una herramienta computacional para archivar información en una base de datos gratuita y realizar estudios relacionados con los sistemas eléctricos de potencia a través de la interfaz gráfica (GUI) y el programa DIgSILENT PowerFactory mediante programación en Python, importa y exporta datos para guardar dentro de la base de datos SQLite y luego ejecutar flujos de potencia usando formato de programas como Pypower. En [27] se integra los sistemas dinámicos a partir de Matlab y Simulink y DIgSILENT Power Factory en el entorno de co-simulación mediante el protocolo de comunicación OPC evitando que operen cerca de los límites y mejore la seguridad y la confiabilidad del estado estable y dinámico del sistema.

1.3. COMPONENTES DE LA PLATAFORMA WAMS

El sistema de monitoreo de área extendida (WAMS) permite mediciones en tiempo real, mediante combinaciones con tecnologías, sistemas y aplicaciones que suministran la observabilidad dinámica de un sistema de potencia [24], [2], en la Figura 1 se muestra la arquitectura de las WAMs.

Figura 1.

Diagrama de la arquitectura centralizada de las WAMs.



Nota. La figura muestra la estructura general de las WAMS (Wide Area Monitoring Systems).

El sistema WAMS y sus componentes [22].

- Unidad de medición fasorial - PMU
- Concentrador de datos del fasores - PDC
- Sistemas de telecomunicaciones del sistema WAMS
- Servidores de aplicaciones WAMS
- Sistemas de aplicaciones WAMS
- Sistemas registro Historial de información WAMS.

Un PMU es un equipo de medición de fasores de tensión y corriente de la red eléctrica, con periodos en el orden de los microsegundos [20], provoca estaciones de fasores sincronizados de frecuencia y de variación de frecuencia (ROCOF) a partir de señales de voltaje y corriente a través del sincronismo temporal [14]frequency, and rate of change of frequency (ROCOF, [28]based on local and remote voltage synchrophasor measurements through Phasor Measurement Unit (PMU).

El PDC o concentrador de datos de fasor es utilizado en sistemas de medición fasorial [14]frequency, and rate of change of frequency (ROCOF, recibe y almacena la información de datos medidos por los PMUs [21].

Un Sincrofotor es un fasor calculado mediante una señal muestreada que utiliza señal de tiempo estándar como referencia de medidas donde tienen una relación de fase definida [14], la ecuación de forma de onda indica en (1):

$$x(t) = X_m \cos \cos (Wt + \phi) \quad (1)$$

Representado como el fasor como indica en (2)

$$X = \left(\frac{X_m}{\sqrt{2}} \right) e^{j\phi} \quad (2)$$

$$X = \left(\frac{X_m}{\sqrt{2}} \right) (\cos \phi + j \sin \phi)$$

$$X = X_r + jX_i$$

Donde:

$$\left(\frac{X_m}{\sqrt{2}} \right): \text{Valor cuadrático medio (RMS)}$$

$$X_r + jX_i: \text{Parte real e imaginaria de un valor complejo}$$

$$\phi: \text{Ángulo de fase}$$

$$\phi: \text{Valor que depende de la escala temporal}$$

1.4. APPLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL

Disponer de aplicaciones que permitan almacenar paquetes de una base de datos gratuita es el objetivo de la herramienta Open source, permitiendo al usuario obtener una iteración amigable y segura al mismo tiempo, para una conversión de base de datos al sistema eléctrico de potencia, los requerimientos de los programas de simulación cambian a la velocidad del cambio de la realidad, lo que permite el traslado de información de programas de simulación principal a herramientas computacionales. DIgSILENT PowerFactory es un programa de cálculo de redes eléctricas y simulación digital, instrumento muy eficaz de diseño asistido por computadora (CAD) en el análisis de los sistemas eléctricos de potencia. El programa accede el análisis de sistemas heterogéneos para aplicaciones como: industriales de generación, transmisión, distribución, además tiene una peculiaridad especial de integración de funciones de cálculo mediante modelos matemáticos y base de datos, que acelera el procesamiento de datos, y combina capacidad de modelado flexible y altamente confiable con algoritmos de solución altamente eficientes [29].

1.4.1 Generalidades de lenguaje en Python

El lenguaje de programación Python de alto nivel es de interpretado, interactivo y orientado a objetos, de código, intuitivo y práctico fácil de asimilar. Trabaja con varios tipos de datos dinámicos utilizados en lenguaje de clase, en este sentido más allá de la programación orientada a objetos permite múltiples paradigmas de programación, como la programación de procedimientos y funcionales [30].

El script define como agregado de instrucciones escritas dentro de un lenguaje de programación que ordena al software qué hacer. Los lenguajes script utilizan una variable semejante para distintas tipologías de datos, ejecutando una facilidad para el desarrollo de la programación frente a lenguajes copilado en los que una variable es notoria para un tipo de datos fijados y solo puede ser

utilizada para datos de este tipo. De esta manera usando el lenguaje script los desarrolladores son capaces de mezclar códigos con diferentes grados de productividad y para ejecutar un script hay que indicarle al interprete el nombre del programa [31].

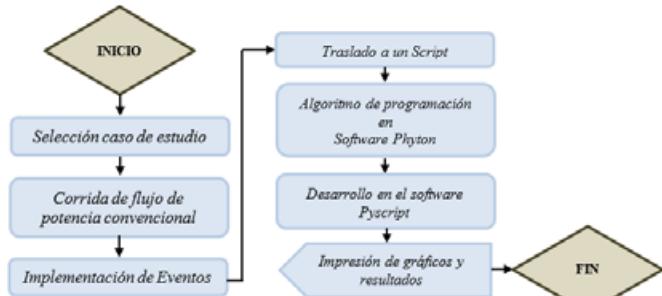
2. MÉTODO

2.1. Flujo de potencia estático de 2 áreas

Se realiza el flujo de potencia en estado estacionario del ejercicio 12.8 del libro Power System Stability and Control, se analiza en detalle los efectos de estructura del sistema como modelado, tipo de excitación y las cargas para determinar características del sistema [32], en la Figura 2 se indica la metodología de estudio.

Figura 2.

Metodología del caso de estudio.



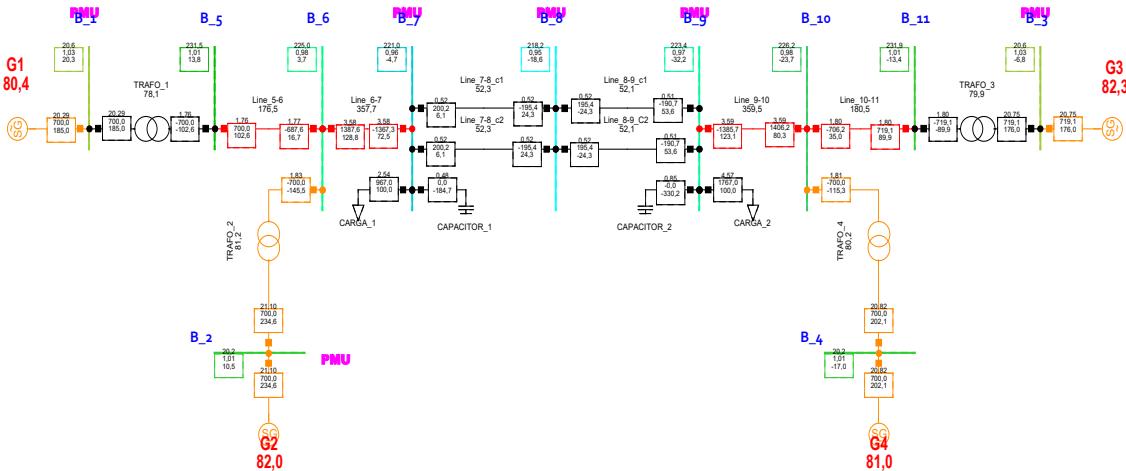
Nota. Representación gráfica de los pasos a seguir para desarrollar el sistema.

En el sistema de prueba para el detalle se procede a realizar el análisis del sistema de potencia, mediante parámetros presentados en el modelo de referencia ejemplo 12.6 (P. Kundur, Power system stability and control [32]).

Se pretende simular y monitorear el sistema eléctrico a través de las PMU, el fenómeno en estabilidad estática y transitoria ya que debe tener la habilidad para mantener

Figura 3.

Flujo de potencia de 2 áreas.



Nota. Caso de estudio implementado en el software Digsilent PowerFactory con la aplicación de PMUs.

en sincronismo luego de que experimente un disturbio severo. A continuación, se ejecuta la implementación en el software de simulación Digsilent PowerFactory como se observa en la Figura 3.

Se procede a colocar PMU's en las barras 1, 3, 7, 8, 9 y 2 para extraer la información fasorial (módulo y ángulo) de voltajes y corrientes para diferentes perturbaciones.

A. Creación de eventos de perturbación

Para el análisis fasorial dinámico se procede a definir eventos de perturbación en el SEP como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1.

Eventos de perturbación para SEP de 2 áreas.

NOMBRE DE EVENTOS	TIEMPO (s)	ELEMENTO SELECCIONADO
Short-circuit Event	20.	Line_8-9_C2
Switch Event	20.01	Line_8-9_C2
Short-circuit Event(1)	20.01	Line_8-9_C2
Switch Event	21.	Line_8-9_C2
Short-circuit Event(2)	60.	B_7
Short-circuit Event(3)	60.05	B_7
Load Event	100.	CARGA_1
Load Event(1)	110.	CARGA_1
Load Event(2)	150.	CARGA_2
Load Event(4)	155.	CARGA_2

Nota. En la tabla 1 muestra los eventos de perturbación definidos en el sistema para observar su comportamiento.

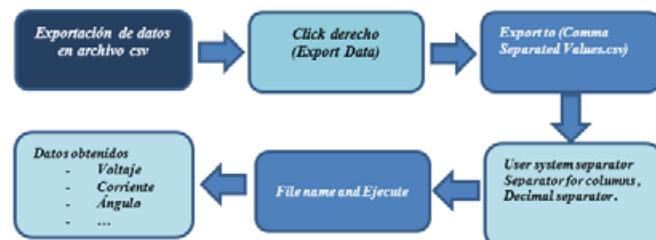
Se crea 4 eventos dinámicos como falla trifásica en línea de transmisión 8-9 del circuito 2, falla trifásica en barra 7, aumento de carga de 40 % en la carga 1 y un aumento de carga del 50% en la carga 2.

B. Exportación de datos fasoriales

Para el proceso de exportación de datos se realiza la simulación en estado dinámico donde extraemos las señales de voltajes, corrientes en magnitud y ángulo desde Digsilent en archivo .csv como se muestra en la Figura 4.

Figura 4.

Exportación de datos en archivo .csv



Nota. En la figura 4 muestra la extracción de datos, para guardarla en un formato determinado.

De manera de exportar con separación con comas y decimales con puntos en un periodo de registro de al menos 200 segundos.

Figura 5.

Archivo .csv

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

Nota. En la figura 5 apreciamos los datos extraídos del sistema en archivo excel csv, datos que sean fáciles de mover de un programa a otro.

C. Desarrollar un script en Python que permita envío de información sincrofatorial

Para el siguiente código de envío de información se crea una ip ficticia 127.0.0.1 con puerto de enlace 1410.

Además, se implementa el uso de las señales extraídas del archivo .csv para el envío de valores como voltajes y corrientes en magnitud y ángulo en el código de Python. Como visualización de señales por parte del software Pyscripter colocamos en código la presentación de señales de referencia angular de la barra 1-7 y 3-9 con su respectivo límite de operación (ver Figura 7), además, potencia activa y reactiva del generador 2.

Se realiza una prueba de conexión con la ip ficticia para visualizar las señales sincrofatoriales con el programa PMU Connection Tester, colocamos la siguiente configuración (ver Figura 8).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. RESPUESTA DE EVENTOS DE PERTURBACIÓN

En la Figura 9 se muestra los eventos exportados en base al estudio dinámico del sistema de 2 áreas sin controladores, que muestran en gran magnitud los eventos definidos en el SEP.

4. CONCLUSIONES

En resumen, los estudios fuera de línea son esenciales para realizar análisis profundos y detallados de eventos. Como se observó, permiten tener un historial de lo ocurrido en el sistema. Cuando un sistema de potencia experimenta una contingencia mientras opera, la prioridad principal es restablecerlo, no analizar el problema en detalle en ese momento. El análisis exhaustivo ocurre una vez que la urgencia de restablecer el sistema ha pasado,

con el objetivo de encontrar la causa raíz del problema y proponer posibles soluciones.

En definitiva, en el estudio se extrajeron datos de respuesta de voltaje y corriente en magnitud y ángulo del software DIgSILENT PowerFactory, tanto sin la implementación de controladores, debido a que se tiene una mejor respuesta en el análisis del sistema frente a los eventos definidos, como se observó en la figura 9, como con controladores. Cabe señalar que al implementar el AVR's el sistema mostró inestabilidad debido a que pierde amortiguamiento y es necesario la implementación de PSS's que ayudaron aportar amortiguamiento al sistema y tener una mejor respuesta frente a los eventos definidos como se observó en la figura 10, de tal manera que los tiempos de estabilidad mejoran en comparación al sistema sin controladores que también es estable pero se prolonga en el tiempo.

Después de modelar un sistema eléctrico de dos áreas en el software DIgSILENT PowerFactory, se definieron eventos de perturbación para realizar simulaciones RMS. Luego de exportar la información de voltajes y corrientes a transmitir, se utilizó Python como herramienta de código abierto. Este lenguaje de programación permitió que el script de Python, actuando como PMUs (Unidades de Medición Fasorial), leyera el archivo exportado de DIgSILENT PowerFactory. A través del PMU Connection Tester, se verificó la transferencia de información al software Pyscript, que funcionó como un PDC (Concentrador de Datos Fasoriales). Esto simuló el monitoreo de una red, permitiendo observar la recopilación, procesamiento y transmisión de datos desde un concentrador.

En definitiva, el software desarrollado permitió detectar las características claves de la onda de las variables eléctricas como potencias, voltajes, corrientes que permitan mejorar la estabilidad y confiabilidad del sistema, como se pudo evidenciar en la figura 13, para así lograr la observabilidad del sistema eléctrico que sus aplicaciones le permiten y cumplir el objetivo que es adquirir conciencia situacional del sistema eléctrico.

REFERENCIAS

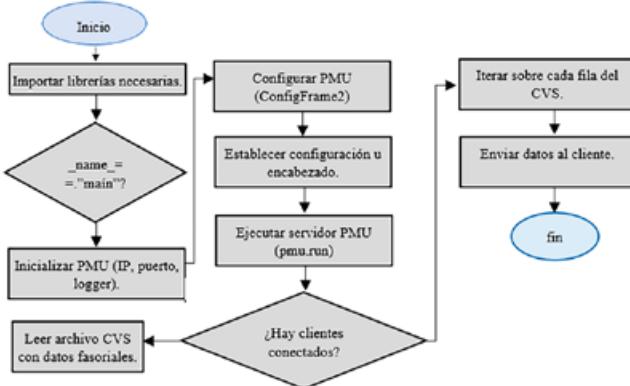
- [1] Z. Huang *et al.*, “Performance evaluation of phasor measurement systems,” *IEEE Power Energy Soc. 2008 Gen. Meet. Convers. Deliv. Electr. Energy 21st Century, PES*, pp. 1–7, 2008, doi: 10.1109/PES.2008.4596880.
- [2] A. Shaobo Wang, R. Huang , X. Ke, J. Zhao, R. Fan, H. Wang, Z. Huang y D. V. Sathanur, “Risk-oriented PMU placement approach in electric power systems,” vol. 14, no. 2, pp. 301–307, 2019, doi: 10.1049/iet-gtd.2019.0957.
- [3] C. Mishra, K. D. Jones, A. Pal, y V. A. Centeno, “Binary particle swarm optimisation-based optimal substation coverage algorithm for phasor measurement unit installations in practical systems,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 2, pp. 555–562, 2016, doi: 10.1049/iet-gtd.2015.1077.
- [4] A. DelaTorre, “Análisis técnico para la Implementación de un Sistema de Monitoreo de Área Extendida (Wams) en el Sistema Nacional Interconectado del Ecuador,” Universidad Politécnica Salesiana sede Quito, 2013.
- [5] A. G. Phadke, “Synchronized phasor measurements a historical overview -,” pp. 476–479, 2002.
- [6] A. Jovičić, “COMPUTATIONALLY EFFICIENT STATE ESTIMATION FOR POWER SYSTEMS WITH CONVENTIONAL AND SYNCHROPHASOR MEASUREMENTS,” University of Belgrade, 2021.
- [7] S. C. G. Cruz, “Esquema de Monitoreo Integrado de Seguridad de Sistemas de Potencia,” Universidad de los Andes, 2016.
- [8] U. Kerin, G. Bizjak, R. Krebs, E. Lerch, and O. Ruhle, “Faster than real time: Dynamic security assessment for foresighted control actions,” *2009 IEEE Bucharest PowerTech Innov. Ideas Towar. Electr. Grid Futur.*, pp. 1–7, 2009, doi: 10.1109/PTC.2009.5282087.
- [9] I. Chychkina, Z. A. Styczynski, C. O. Heyde, and R. Krebs, “Power system instability prevention and remedial measures with online Dynamic Security Assessment,” *2015 IEEE Eindhoven PowerTech, PowerTech 2015*, 2015, doi: 10.1109/PTC.2015.7232303.
- [10] Diego Aguas, “Implementación de una plataforma de simulación digital en tiempo real para entrenamiento de operadores ante fenómenos dinámicos,” ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, 2020.
- [11] D. Pérez Llamuca, “Herramienta computacional en software libre para conversión de bases de datos del sistema eléctrico de potencia entre diferentes plataformas de simulación,” 2021. [Online]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21575?mode=full>
- [12] IEEE, *IEEE Std 1344-1995(R2001) : IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems.*, vol. 1995. 1995.
- [13] IEEE Power Engineering Society, *IEEE Std C37.118-2005*, vol. 2005, no. March. 2005. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=660853
- [14] IEEE-SA Standards Board, *IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems*, vol. C37.118.1TM, no. December. 2011.
- [15] P. System, R. Committee, I. Power, y E. Society, “IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems -- Amendment 1: Modification of Selected Performance Requirements,” *IEEE Std C37.118.1a-2014 (Amendment to IEEE Std C37.118.1-2011)*, vol. 2014, pp. 1–25, 2014.
- [16] K. Sato, Z. Yamazaki, T. Haba, N. Fukushima, K. Masegi, y H. Hayashi, “Dynamic simulation of a power system network for dispatcher training,” *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-101, no. 10, pp. 3742–3750, 1982, doi: 10.1109/TPAS.1982.317059.

- [17] P. Brogan, J. Morrow, R. Best, y D. Laverty, "Python PSS/E simulation to test efficacy of proposed PMU based WAMS and potential WAMPAC applications," *Proc. Univ. Power Eng. Conf.*, pp. 1–5, 2013, doi: 10.1109/UPEC.2013.6714952.
- [18] T. Kataoka, M. Shitsukawa, y A. Tajimi, "Improvement in coordinated restoration operation skills covering more than one area (Developing a power system operation training simulator that precisely reproduces electrical phenomena)," *44th Int. Conf. Large High Volt. Electr. Syst. 2012*, 2012.
- [19] M. R. Hasan, L. Vanfretti, W. Li, y N. A. Khan, "Generic high level VSC-HVDC grid controls and test systems for offline and real time simulation," *9th Int. 2014 Electr. Power Qual. Supply Reliab. Conf. PQ 2014 - Proc.*, pp. 57–64, 2014, doi: 10.1109/PQ.2014.6866784.
- [20] G. J. Araque y R. Barba, "Unidades de Medición Fasorial - PMU," pp. 247–253, 2010.
- [21] G. Rivera y A. D. La Torre, "Estrategias para la Implementación de un Sistema de Monitoreo de Área Extendida WAMS en el Sistema Nacional Interconectado del Ecuador," *Rev. Técnica "Energía,"* vol. 9, no. 1, pp. 34–43, 2013, doi: 10.37116/revistaenergia.v9.n1.2013.134.
- [22] R. C. H. Lara, "Herramientas de Software Libre para Aplicaciones en Ciencias e Ingeniería," *Rev. Politécnica*, vol. 32, no. 1, pp. 1–8, 2013, [Online]. Available: <http://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.p>
- [23] A. Villamarín, y D. Espín, "Diseño e Implementación de un Prototípico de Unidad de Medición, Fasorial (PMU - Phasor Measurement Unit) para el Monitoreo, Control y Protección de Sistemas Eléctricos". *Revista Técnica "Energía"* No. 11, pp. 127–135, 2015.
- [24] E. Arconel, "REGULACIÓN No. ARCONEL – 003/16 Requerimientos para la supervisión y control en tiempo real del Sistema Nacional Interconectado," pp. 1–27, 2016.
- [25] L. Bonilla y R. Cubillo, "Determinación de límites de seguridad estática de ángulo en el SNI a partir de mediciones sincrofatoriales," *Rev. Técnica "Energía,"* vol. 15, no. 1, pp. 90–97, 2018.
- [26] P. M. Pozo, I. A. Pozo, and N. A. Pozo, "Design and Construction of a Low-Cost Phasor Measurement Unit (PMU) for Three-Phase Distribution Power Systems according to the norm IEEE Diseño e Implementación de una (PMU) de baja potencia para Sistemas," no. 16, pp. 8–16, 2019.
- [27] L. L. Chiza, "Co-simulation between PowerFactory and Matlab / Simulink for the simulation of an HVDC link integrated to the 39-bus system Co-simulación entre PowerFactory y Matlab / Simulink para la simulación de un enlace HVDC integrado al sistema de 39 barras," no. 19, pp. 150–157, 2022.
- [28] R. Franco, "Uso de Sincrofasores para la Detección de Oscilaciones de Potencia y Pérdida de Sincronismo . Aplicación al Sistema Eléctrico Uruguayo para la Separación Controlada en Islas" Universidad de la República de Uruguay, 2012.
- [29] F. Gonzalez Longatt, "DIgSILENT PowerFactory (Manual de Usuario)," no. April, pp. 1–2, 2004, [Online]. Available: file:///C:/Users/Personal/Downloads/Manual_de_Usuario_DiG SILENT_Parte_I.pdf
- [30] R. González and Lez, *Python Para todos.* 2015.
- [31] M. Pérez Domínguez, "Extensión de Aplicaciones mediante Python embebido," ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y SISTEMAS DE TELECOMUNICACIÓN, 2017.
- [32] P. Kundur, "Power System Stability and Control - Pra-bha Kundur - McGraw-Hill Education." p. 1176, 1994. [Online]. Available: <https://www.mheducation.co.in/html/9780070635159.html>

ANEXOS

Figura 6.

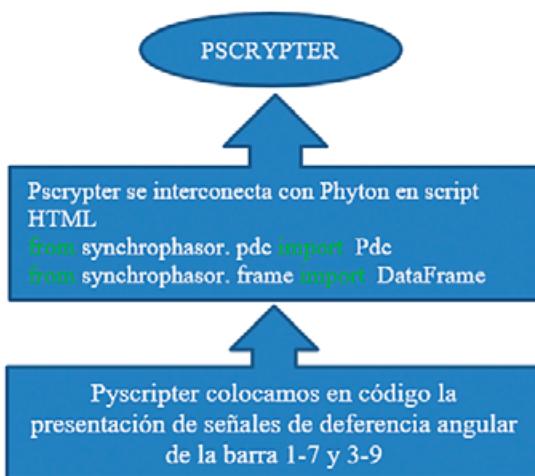
Script para envío de información sincrofatorial.



Nota. En la figura 6 hace referencia al protocolo TCP/IP de la máquina que esté funcionando correctamente y el puerto garantiza la entrega del paquete de datos en orden.

Figura 7

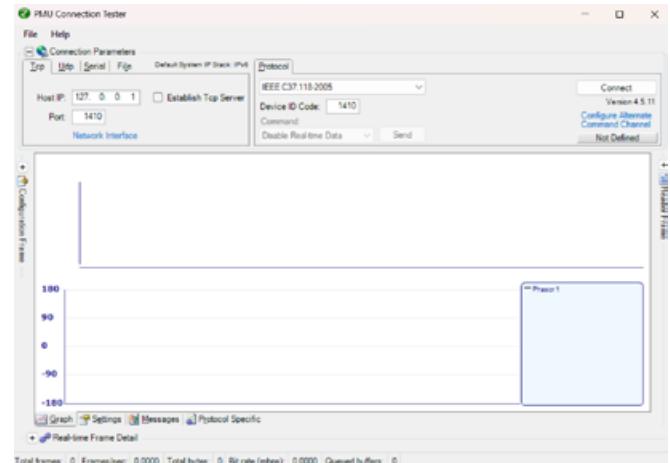
Script para recepción de información sincrofatorial.



Nota. En la figura 7 muestra el sistema Pyscripter donde se interconecta el código Python en un script HTML.

Figura 8.

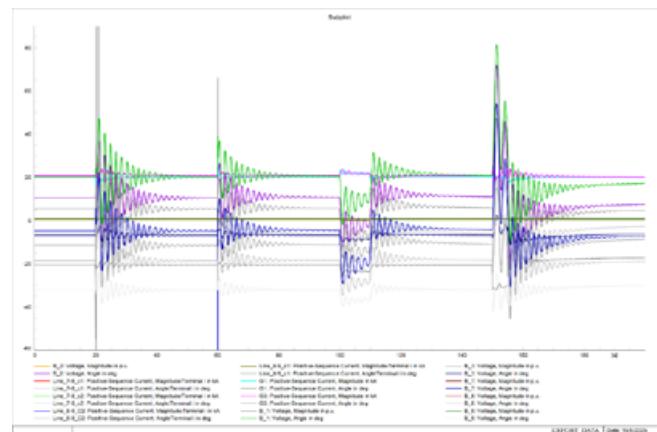
Configuración del PMU Connection Tester.



Nota. En la figura 8 se observa el ingreso de la IP en la dirección de internet del dispositivo probado y en el puerto, el número de puerto que se conecta al dispositivo y recibe datos del mismo.

Figura 9.

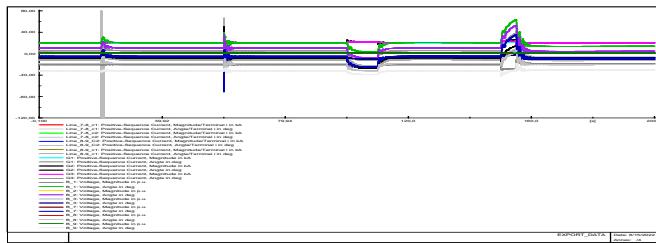
Eventos definidos de perturbación del SEP sin controladores.



Nota. En la figura 9 se verifica los eventos provocados en el SEP sin controladores los mismos que podrían ser interrupciones, variaciones de voltaje, frecuencia o sobre corriente.

Figura 10.

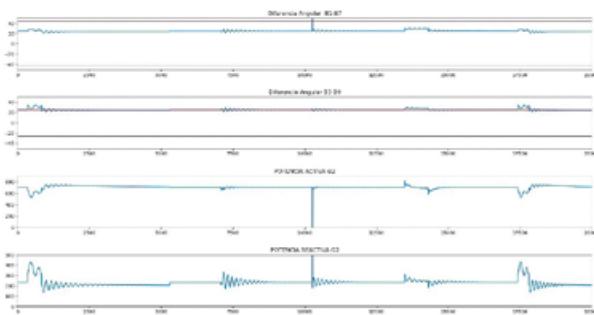
Eventos definidos de perturbación del SEP con controladores AVR y PSS.



Nota. En la figura 10 se puede apreciar como el estabilizador del sistema de potencia y el regulador automático de voltaje controlan la tensión y las oscilaciones en el sistema eléctrico.

Figura 11.

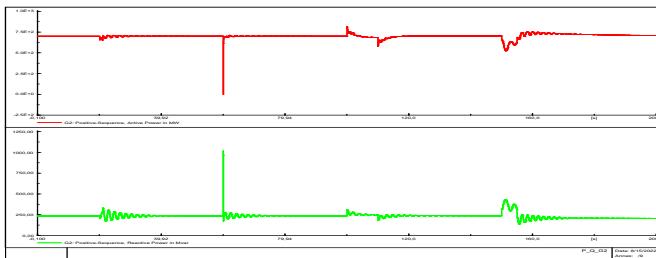
Gráfica de respuesta por Pyscripter.



Nota. En la figura 11 se puede observar el grafico creado en Pyscript mediante la ejecución de Python donde se visualiza como resultado la diferencia angular de las barras seleccionadas.

Figura 12.

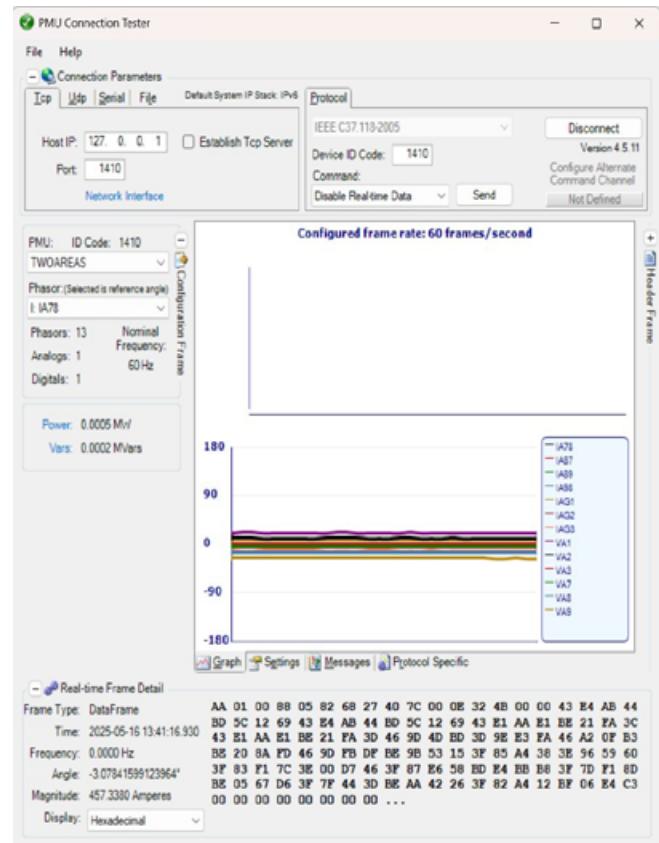
Gráfica de respuesta de potencia activa y reactiva del generador 2 por Digsilent.



Nota. Mediante el software de gran alcance como digsilent se puede apreciar las gráficas de potencia activa y reactiva las mismas que fueron entregadas por el programa para su análisis.

Figura 13.

Gráfica de respuesta por PMU Connection Tester.



Total frames: 8718 Frames/sec: 31.9939 Total bytes: 118624 Bit rate (Mbps): 0.0332 Queued buffers: 0

Nota. En la figura 13 se observa el probador de conexión PMU que verifica la recepción de flujo de datos de medición fasorial y valida la conexión de flujos de dispositivos, además se visualiza gráficamente los datos sincrofatoriales.