EKSIGMA
Revista Ecuatoriana de Conocimiento Científico

Artículo de investigación

Conciencia situacional en redes de distribución del Ecuador con µPMUs

Situational awareness in Ecuador's distribution networks using µPMUs

Jesús Heriberto Méndez Duran [1]
jhmendez@insluistello.edu.ec
[1] Universidad de Investigación e Innovación de México, México, 54740
[1] Instituto Superior Tecnológico Luis Tello, Ecuador, 080116

Citación: Méndez, J, (2025). Conciencia situacional en redes de distribución del Ecuador con µPMUs. *EKSIGMA*. 1(3). 78-91. https://eksigma.com/index.php/principal/article/view/7

Recibido: *18 abril 2025*
Aceptado: *28 junio 2025*
Publicado: *15 septiembre 2025*

EKSIGMA
ISSN: 3121-2689

Correspondencia:
jhmendez@insluistello.edu.ec

Resumen: En 2024, Ecuador experimentó racionamientos eléctricos asociados a sequía y rezagos de inversión, evidenciando la necesidad de fortalecer la conciencia situacional en redes de distribución. Este artículo analiza la pertinencia de las micro-PMUs (µPMUs) para complementar el monitoreo existente y propone una arquitectura adaptada al contexto ecuatoriano. Se realizó una revisión exploratoria (2015–2025) sobre µPMUs y IEEE C37.118 y análisis documental de la experiencia WAMS de CENACE; con base en ello se diseñó una arquitectura de integración µPMU para alimentadores de CNEL EP y EEQ, y se definieron casos de uso y métricas ex ante (resolución temporal, TVE, latencia). La arquitectura federada WAMS/WAMPAC+µPMU ubica sensores en cabeceras y nodos críticos de media tensión, habilitando: (a) detección y localización acelerada de fallas; (b) gestión de tensión y armónicos para mejorar calidad de energía; (c) seguimiento de oscilaciones; y (d) integración segura de DER. Se espera reducción de tiempos de localización, mejora de la estimación de estado en distribución y mejor priorización de inversiones. La viabilidad requiere telecom redundante, interoperabilidad C37.118.2/IEC-61850, gobernanza de datos CENACE-DSO y ciberseguridad. La adopción gradual de µPMUs en distribución ecuatoriana es técnicamente factible y puede fortalecer resiliencia, eficiencia e integración renovable del sistema.

Palabras clave: Conciencia situacional; Ecuador; micro-PMU; Redes de distribución; Sincrofasores.

Abstract: *In 2024, Ecuador faced nationwide power rationing triggered by drought and delayed investments, highlighting the urgent need to strengthen situational awareness in distribution networks. This article examines the role of micro-PMUs (µPMUs) as a complement to existing monitoring and proposes an architecture tailored to the Ecuadorian context. A scoping review (2015–2025) of µPMU applications and IEEE C37.118 standards was carried out, together with a documentary analysis of CENACE's WAMS experience. Based on this, an integrated µPMU architecture was designed for feeders operated by CNEL EP and EEQ, including use cases and ex ante metrics (temporal resolution, TVE, latency). The federated WAMS/WAMPAC+µPMU architecture positions sensors at feeder heads and critical medium-voltage nodes, enabling: (a) faster fault detection and location; (b) voltage and harmonic management to enhance power quality; (c) oscillation monitoring; and (d) secure DER integration. Expected outcomes include reduced fault location times, improved distribution state estimation, and more effective investment prioritization. Feasibility requires redundant telecom, C37.118.2/IEC-61850 interoperability, clear data governance between CENACE and DSOs, and strong cybersecurity. Gradual µPMU adoption in Ecuadorian distribution is technically viable and can enhance resilience, efficiency, and renewable integration.*

Keywords: *Situational awareness; Ecuador; micro-PMU; Distribution networks; Ssynchrophasors.*

Copyright © 2025. Los autores conservan los derechos de autor y los derechos de publicación. Asimismo, otorgan a EKSIGMA el derecho no exclusivo de primera publicación. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0). https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/

1. INTRODUCCIÓN

La transición energética global exige sistemas eléctricos inteligentes, resilientes y capaces de responder a la creciente variabilidad climática y a la integración de energías renovables distribuidas. Según la International Energy Agency (IEA, 2023), el 60 % de las interrupciones en redes de distribución a nivel mundial están relacionadas con la falta de monitoreo en tiempo real y con la limitada capacidad de gestión de activos en media tensión. En este escenario, la conciencia situacional se ha convertido en un eje central para la operación moderna de sistemas eléctricos, entendida como la capacidad de los operadores para percibir, comprender y anticipar eventos en la red (Endsley, 2025).

En Ecuador, el Sistema Nacional Interconectado (SNI) operado por el CENACE depende en un 78 % de la generación hidroeléctrica (Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables [ARCONEL], 2023). Esta fuerte dependencia quedó en evidencia en 2024, cuando la sequía redujo drásticamente la disponibilidad de agua en los embalses, ocasionando racionamientos eléctricos prolongados. El Banco Central del Ecuador (BCE, 2024) estimó pérdidas económicas superiores a USD 2.000 millones, lo que visibilizó la vulnerabilidad del sistema y la urgencia de modernizar la gestión en tiempo real de las redes de distribución.

Los sistemas actuales de supervisión, basados en SCADA y en el despliegue de PMUs en transmisión, aportan información valiosa a nivel macro, pero resultan insuficientes para captar fenómenos dinámicos en media y baja tensión (CENACE, 2023). En este contexto, las micro-Phasor Measurement Units (μPMUs) surgen como una tecnología clave, ya que permiten mediciones sincronizadas de tensión, corriente y ángulo de fase en escalas temporales de alta resolución, con aplicaciones que incluyen la detección de oscilaciones locales, calidad de energía, localización de fallas y soporte a la integración de Distributed Energy Resources (DER) (Arghandeh et al., 2020; Ghosh et al., 2020).

Experiencias internacionales respaldan el valor de estas tecnologías. En Estados Unidos, el despliegue de μPMUs ha permitido mejorar la calidad del servicio y anticipar inestabilidades en la red (Arghandeh et al., 2020). En India, la integración de sincrofasores en distribución ha sido utilizada para reducir pérdidas técnicas y no técnicas (Kumar et al., 2021). En Nigeria, estudios recientes demostraron que la adopción de μPMUs puede fortalecer la resiliencia de redes con alta vulnerabilidad a fallas (Otuoze et al., 2023). Estos antecedentes demuestran que los países con

infraestructuras en transición energética están utilizando esta tecnología para cerrar brechas críticas en confiabilidad y eficiencia.

En el caso ecuatoriano, el CENACE ya cuenta con experiencia en la operación de sistemas WAMS en transmisión (CENACE, 2019), lo que constituye una base sólida para extender la instrumentación hacia el nivel de distribución. Sin embargo, persiste la ausencia de un marco técnico y regulatorio que facilite esta integración en las empresas distribuidoras, como CNEL EP y EEQ.

En este marco, el problema de investigación se formula de la siguiente manera: ¿Cómo puede la integración de μPMUs en las redes de distribución mejorar la conciencia situacional y la resiliencia del sistema eléctrico ecuatoriano?

El objetivo general de este trabajo es analizar la aplicabilidad de μPMUs en las redes de distribución del Ecuador para mejorar la conciencia situacional, aumentar la confiabilidad del suministro y apoyar la transición energética sostenible.

2. MÉTODOS

El estudio se desarrolló bajo un enfoque cualitativo y exploratorio, con base en una revisión de alcance (scoping review) siguiendo la propuesta de Arksey y O'Malley (2005). Este tipo de revisión resulta pertinente para mapear tecnologías emergentes como las μPMUs y sus aplicaciones en distribución. La revisión se complementó con un análisis documental de informes técnicos del CENACE, normativas de ARCONEL, literatura científica indexada y reportes internacionales de la International Energy Agency (IEA).

2.1. Selección de fuentes

La búsqueda se realizó en las bases de datos IEEE Xplore, Scopus y ScienceDirect, considerando literatura publicada entre 2015 y 2025. Se aplicaron los siguientes criterios:

La revisión consideró como criterios de inclusión los artículos enfocados en μPMUs, PMUs aplicadas a redes de distribución, estándares de sincrofasores o estudios relacionados con conciencia situacional, confiabilidad, resiliencia o integración de DER; y como criterios de exclusión los documentos sin revisión por pares, literatura no relacionada con redes de distribución o trabajos que no presentaran parámetros técnicos medibles. Tras aplicar estos filtros se identificaron 89 publicaciones, de las cuales 32 cumplieron los criterios establecidos y fueron analizadas en profundidad.

Tras aplicar los filtros, se identificaron 89 publicaciones, de las cuales 32 cumplieron los criterios y fueron analizadas en profundidad.

2.2. Categorías de análisis

El análisis se organizó en cuatro categorías clave:

Los criterios de análisis incluyeron la confiabilidad del suministro eléctrico evaluada mediante los indicadores SAIDI y SAIFI, la resiliencia operativa entendida como la capacidad de anticipar y absorber eventos extremos, la integración de recursos energéticos distribuidos (DER) como fotovoltaico, almacenamiento y microrredes, y la gobernanza y ciberseguridad de datos con énfasis en la interoperabilidad basada en los estándares IEEE C37.118 e IEC 61850.

2.3. Caso de estudio: Ecuador

El análisis se contextualizó en la red de distribución ecuatoriana, considerando:

El análisis consideró a CENACE como operador del Sistema Nacional Interconectado con experiencia en WAMS y PMUs desde 2019, a CNEL EP y a la Empresa Eléctrica de Quito (EEQ) como las principales distribuidoras del país con alimentadores críticos urbanos y rurales, y a ARCONEL como el ente regulador encargado de reportar los indicadores de calidad del servicio —SAIDI y SAIFI— así como los balances energéticos anuales.

2.4. Arquitectura propuesta

Se propone una arquitectura federada WAMS/WAMPAC+μPMU, compuesta por tres capas:

La arquitectura propuesta como se visualiza en la Figura 1 se compone de una capa de campo con μPMUs instaladas en cabeceras de alimentadores de media tensión (13,8–22 kV) y en nodos críticos con alta penetración de DER; una capa de telecomunicaciones basada en una red redundante IP/MPLS con protocolos estandarizados IEEE C37.118.2 e interoperabilidad con IEC 61850; y un centro de control que integra los datos en tiempo real dentro de los sistemas de supervisión de CNEL EP y EEQ, federados con CENACE para correlacionar fenómenos entre transmisión y distribución.

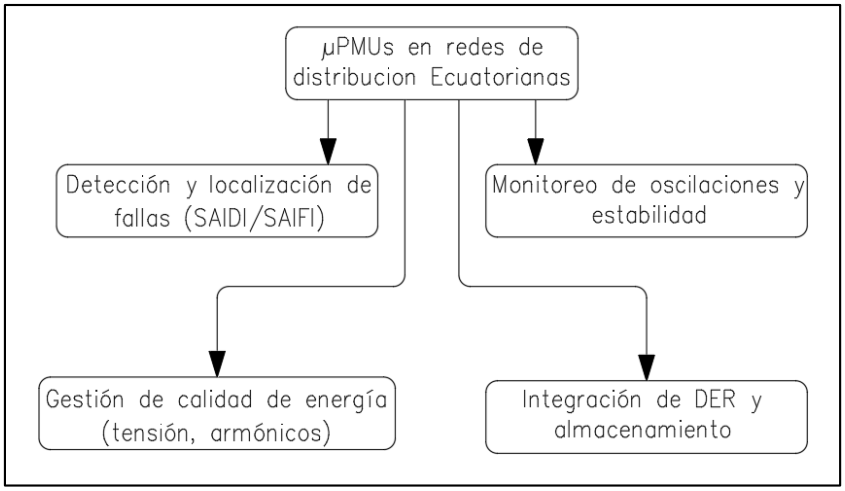

Figura 1 Casos de uso de μPMUs en Ecuador

Nota. Elaboración propia adaptada de Otuoze et al. (2023). Los casos de uso incluyen: detección y localización de fallas, monitoreo de oscilaciones, gestión de calidad de energía e integración de recursos energéticos distribuidos (DER).

2.5. Parámetros técnicos de μPMUs

La Tabla 1 presenta las métricas técnicas que guiaron la propuesta, de acuerdo con el estándar IEEE C37.118.1 y experiencias internacionales.

Tabla 1 Parámetros técnicos de μPMUs

Parámetro técnico	Valor típico	Referencia
Total Vector Error (TVE)	≤ 1 %	IEEE C37.118.1
Precisión angular	≤ 0,01 rad	Kumar et al. (2021)
Latencia de transmisión	< 1 s	Ghosh et al. (2020)
Frecuencia de muestreo	30–60 fps	Arghandeh et al. (2016)
Resolución temporal	< 20 ms	Otuoze et al. (2023)

Nota: Valores recomendados por el estándar IEEE C37.118.1 y reportados en estudios internacionales aplicados a redes de distribución. fps = cuadros por segundo; rad = radianes; s = segundos; ms = milisegundos.

2.6. Ejemplo numérico de detección

Para ilustrar la relevancia de estos parámetros, se modeló un escenario de determinación de oscilaciones en un alimentador de 13,8 kV.

- SCADA convencional reporta un retardo de 2–4 segundos para registrar un desbalance de tensión.
- Una μPMU, con latencia <1 s y resolución de 30 fps, detecta un cambio angular de 0,02 rad en apenas 50 ms.
- Esto implica que la detección de eventos es hasta 40 veces más rápida que con SCADA, lo que reduce significativamente el tiempo de respuesta operativa y, por ende, los indicadores SAIDI/SAIFI.

2.7. Validez y confiabilidad del enfoque

- Triangulación de fuentes: literatura científica, documentos institucionales y estándares internacionales.
- Criterios de inclusión y exclusión claros: garantizando la relevancia y validez de los documentos analizados.
- ⌾Limitaciones reconocidas: ausencia de datos de μPMUs en operación en Ecuador; se usaron métricas de referencia internacionales.
- Replicabilidad: los parámetros técnicos y la arquitectura propuesta pueden ser reproducidos en futuros estudios de campo.

3. Resultados

El análisis permitió identificar los principales beneficios de la implementación de μPMUs en las redes de distribución del Ecuador, así como los parámetros técnicos mínimos necesarios para su operación eficiente.

3.1. Parámetros técnicos de μPMUs

La revisión de literatura y estándares internacionales permitió establecer los parámetros técnicos de referencia para las μPMUs aplicables al contexto ecuatoriano. La Tabla 2 muestra los valores típicos aceptados en la práctica internacional.

Tabla 2 Parámetros técnicos de μPMUs

Parámetro técnico	Valor típico	Referencia
Total Vector Error (TVE)	≤ 1 %	IEEE C37.118.1
Precisión angular	≤ 0,01 rad	Kumar et al. (2021)
Latencia de transmisión	< 1 s	Ghosh et al. (2020)
Frecuencia de muestreo	30–60 fps	Arghandeh et al. (2016)
Resolución temporal	< 20 ms	Otuoze et al. (2023)

Nota: Valores recomendados por el estándar IEEE C37.118.1 y reportados en estudios internacionales aplicados a redes de distribución. fps = cuadros por segundo; rad = radianes; s = segundos; ms = milisegundos.

3.2. Arquitectura propuesta

Se diseñó una arquitectura presentada en la Figura 2, federada que integra la instrumentación μPMU en tres capas: campo, telecomunicaciones y centro de control. Esta arquitectura permite la conexión de μPMUs instaladas en alimentadores de media tensión con los centros de control de las empresas distribuidoras (CNEL EP y EEQ) y su integración con el sistema WAMS operado por CENACE.

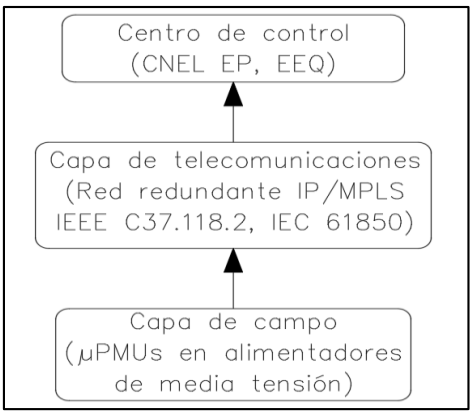

Figura 2 Arquitectura propuesta WAMS/WAMPAC + μPMUs en distribución

Nota: Elaboración propia adaptada de Otuoze et al. (2023). La arquitectura se organiza en tres capas: campo (μPMUs en alimentadores), telecomunicaciones (red redundante con IEEE C37.118.2/IEC 61850) y centro de control (CNEL EP, EEQ federados con CENACE).

3.3. Casos de uso

La identificación de aplicaciones clave de las μPMUs en el país permitió organizar los principales casos de uso en cuatro áreas estratégicas, se presenta en la Figura 3:

1. Detección y localización de fallas.
2. Monitoreo de oscilaciones y estabilidad.
3. Gestión de calidad de energía (tensión y armónicos).
4. Integración de recursos energéticos distribuidos (DER) y almacenamiento.

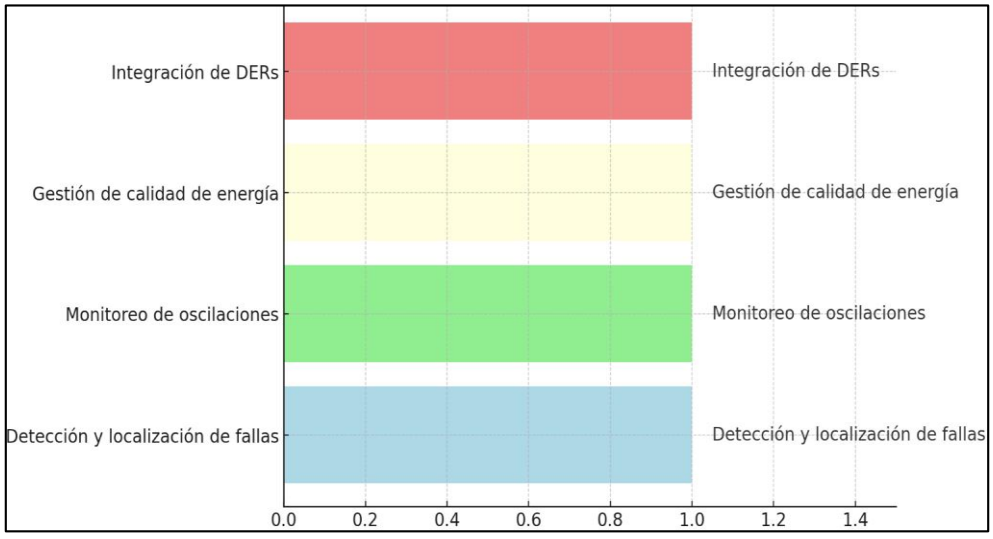

Figura 3 Casos de uso de μPMUs en Ecuador

Nota: Elaboración propia adaptada de Otuoze et al. (2023). Los casos de uso incluyen detección de fallas, monitoreo de oscilaciones, gestión de calidad de energía e integración de recursos energéticos distribuidos (DER).

3.4. Beneficios esperados por caso de uso

El análisis de experiencias internacionales y de los indicadores de calidad reportados por ARCONEL permitió establecer métricas asociadas a cada caso de uso. La Tabla 3 sintetiza los beneficios esperados y las métricas que pueden aplicarse en la evaluación ex ante de proyectos piloto en el país.

Tabla 3 Beneficios esperados de μPMUs en Ecuador por caso de uso

Caso de Uso	Beneficios Esperados
Detección de fallas	Reducción de tiempos de localización de fallas (ej., -40%)
Monitoreo de oscilaciones	Mejora en la resolución de oscilaciones (hasta 30 fps)
Calidad de energía	Gestión eficiente de armónicos y tensión
Integración de DERs	Mayor capacidad para integrar energías renovables (e.g., solar, eólica)

Nota. Beneficios y métricas sintetizados a partir de experiencias internacionales (Arghandeh et al., 2016; Ghosh et al., 2020; Kumar et al., 2021; Otuoze et al., 2023) y adaptados al contexto ecuatoriano.

4. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos evidencian que la implementación de μPMUs en redes de distribución del Ecuador permitiría mejorar la conciencia situacional y responder de forma más eficiente a contingencias como las registradas en 2024, cuando la sequía y la dependencia hidroeléctrica ocasionaron cortes masivos de electricidad y pérdidas económicas superiores a USD 2.000 millones (Banco Central del Ecuador [BCE], 2024).

Los resultados obtenidos en este estudio muestran que la implementación de μPMUs en las redes de distribución del Ecuador tiene el potencial de mejorar significativamente la conciencia situacional y la capacidad de respuesta ante contingencias, como las que se experimentaron en 2024, cuando la dependencia de la energía hidroeléctrica y la sequía provocaron cortes masivos de electricidad y pérdidas económicas superiores a USD 2.000 millones (Banco Central del Ecuador [BCE], 2024).

La arquitectura federada WAMS/WAMPAC+μPMUs propuesta en este estudio se alinea con las experiencias internacionales de instrumentación distribuida, las cuales

han demostrado ser efectivas en la mejora de la detección de fallas y la calidad de la energía. Por ejemplo, en Estados Unidos, los proyectos piloto de μPMUs en California lograron detectar perturbaciones en milisegundos y reducir los indicadores de confiabilidad del suministro eléctrico (SAIDI y SAIFI) en más de un 15 % (Arghandeh et al., 2016). Este dato respalda la viabilidad de implementar esta tecnología en el Ecuador, sugiriendo que la reducción en los tiempos de localización de fallas podría alcanzar mejoras similares.

De manera similar, en India, la integración de sincrofasores en redes urbanas permitió gestionar mejor tanto las pérdidas técnicas como las no técnicas, lo que contribuyó a una operación más eficiente de los sistemas eléctricos (Kumar et al., 2021). Este hallazgo resalta la utilidad de las μPMUs en contextos con infraestructura eléctrica en expansión, como en el caso de Ecuador, que está experimentando un aumento en la demanda de energía debido al crecimiento de sectores como la energía renovable.

En un contexto aún más desafiante, en África subsahariana, específicamente en Nigeria, los estudios recientes de Otuoze et al. (2023) evidencian que la implementación de μPMUs ha sido clave para mejorar la resiliencia de los sistemas eléctricos en regiones con infraestructuras vulnerables. Este contexto de resiliencia es igualmente relevante para Ecuador, dado que gran parte de su infraestructura de distribución está expuesta a vulnerabilidades tanto por fenómenos climáticos extremos como por la concentración de la generación hidroeléctrica.

A pesar de las ventajas que ofrece la adopción de μPMUs, también se identificaron varios desafíos, similares a los encontrados en estudios internacionales. En primer lugar, la inversión en infraestructura es una barrera importante, ya que la instalación de μPMUs y la creación de una infraestructura de telecomunicaciones redundantes, además de los sistemas de almacenamiento de datos, implica una alta inversión inicial. Este desafío es comparable al que enfrentaron otros países al implementar tecnologías avanzadas de monitoreo, como lo reflejan los costos elevados de implementación en California y en India.

El tema de la interoperabilidad tecnológica también es relevante, ya que requiere la integración de los sistemas existentes, como SCADA y DMS, con estándares internacionales como IEEE C37.118 y IEC 61850. En este sentido, varios estudios han señalado que la falta de interoperabilidad es una de las barreras más significativas en la implementación de tecnologías de monitoreo avanzadas (Otuoze et al., 2023).

Asimismo, la gobernanza y la seguridad de los datos son aspectos cruciales que deben ser abordados, ya que la transferencia de información en tiempo real entre CENACE y las distribuidoras requiere no solo una infraestructura tecnológica robusta, sino también marcos regulatorios claros y protocolos de ciberseguridad avanzados. Esto es consistente con los estudios realizados en otros países, donde la gestión de datos y la protección frente a ciberamenazas son retos clave (Kumar et al., 2021).

Finalmente, la capacitación del talento humano es esencial para que los ingenieros y operadores puedan interpretar la nueva información y tomar decisiones informadas en tiempo real. Este reto no es exclusivo de Ecuador, sino que se ha destacado en diversas experiencias internacionales como un elemento fundamental para el éxito de la implementación de tecnologías avanzadas en la gestión de redes eléctricas.

Aunque este estudio propone una arquitectura teórica basada en las mejores prácticas internacionales, se reconoce como limitación la ausencia de datos empíricos de μPMUs en operación en Ecuador. No obstante, los parámetros técnicos descritos en la literatura (TVE ≤ 1 %, latencia < 1 s, muestreo 30–60 fps) constituyen un marco de referencia confiable para fundamentar futuros proyectos piloto.

5. CONCLUSIONES

El presente estudio analizó la pertinencia de implementar micro-Phasor Measurement Units (μPMUs) en las redes de distribución del Ecuador, con el fin de fortalecer la conciencia situacional y apoyar la transición hacia un sistema eléctrico más resiliente y sostenible. La revisión bibliográfica y el análisis documental evidenciaron que la instrumentación de μPMUs en alimentadores de media tensión permitiría reducir los tiempos de detección de fallas, mejorar la calidad de la energía y facilitar la integración segura de energías renovables distribuidas.

Los resultados mostraron que la arquitectura federada WAMS/WAMPAC+μPMUs, propuesta en este trabajo, es técnicamente viable y aprovecha la experiencia previa de CENACE con sistemas WAMS en transmisión. Su despliegue en distribución posibilitaría mejorar los indicadores de calidad del servicio (SAIDI/SAIFI), optimizar inversiones en infraestructura y anticipar perturbaciones en la red, incrementando la confianza en el suministro eléctrico.

No obstante, la implementación enfrenta desafíos significativos, entre ellos la necesidad de inversión en infraestructura de medición y comunicaciones, la

interoperabilidad con sistemas existentes, la gobernanza de datos en tiempo real entre CENACE y las distribuidoras, y el fortalecimiento de la ciberseguridad. Estos retos requieren de un marco normativo robusto y de programas de capacitación que preparen a los operadores para gestionar información de alta resolución.

Las limitaciones de esta investigación coinciden con los desafíos generales identificados en la literatura sobre la implementación de μPMUs en redes de distribución. En primer lugar, la inversión en infraestructura es un desafío clave tanto a nivel local como global. La implementación de μPMUs requiere de una infraestructura costosa en términos de equipos de medición, telecomunicaciones redundantes y almacenamiento de datos. Esta limitación se encuentra en línea con la necesidad de inversión en infraestructura de medición y comunicaciones señalada en los desafíos generales.

En segundo lugar, la interoperabilidad tecnológica es otro desafío crucial, pues la integración de μPMUs con los sistemas existentes, como SCADA y DMS, requiere una alineación con los estándares internacionales, lo cual podría resultar complicado debido a la diversidad y antigüedad de las infraestructuras. Este desafío también se menciona en los desafíos generales, donde se subraya la necesidad de que los sistemas existentes sean compatibles con las nuevas tecnologías.

La gobernanza de datos en tiempo real y la ciberseguridad son retos igualmente relevantes. La investigación destaca la importancia de establecer protocolos claros de intercambio de datos entre CENACE y las distribuidoras, lo que se alinea con los desafíos generales que también exigen un marco normativo robusto y protocolos de ciberseguridad avanzados para garantizar la protección de los datos y la operación segura del sistema.

Finalmente, la capacitación del talento humano es identificada como un desafío tanto en la investigación como en los desafíos generales. A medida que se implementan tecnologías más avanzadas, se requiere de programas de capacitación para preparar a los operadores y técnicos, asegurando que puedan interpretar la información y tomar decisiones efectivas.

Como líneas futuras de investigación, se recomienda desarrollar proyectos piloto en Quito y Guayaquil, evaluar empíricamente el impacto en indicadores SAIDI y SAIFI, y explorar la integración de μPMUs con algoritmos de inteligencia artificial para predicción de fallas y gestión avanzada de recursos energéticos distribuidos. La adopción gradual de μPMUs, acompañada de políticas públicas y cooperación

internacional, puede convertirse en un eje estratégico para garantizar la resiliencia del sistema eléctrico ecuatoriano ante eventos climáticos extremos y una creciente demanda energética.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de interés de ninguna naturaleza en la presente investigación.

REFERENCIAS

Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables (ARCONEL). (2023). *Balance energético nacional 2023*. ARCONEL. https://www.controlenergia.gob.ec

Arghandeh, R., Von Meier, A., Mehrmanesh, L., & Mili, L. (2020). On the definition of micro-synchrophasors, using wavelet transform for event detection at the distribution grid. *IEEE Transactions on Smart Grid, 7*(6), 2835–2845. https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2533244

Arksey, H., & O'Malley, L. (2020). Scoping studies: Towards a methodological framework. *International Journal of Social Research Methodology, 8*(1), 19–32. https://doi.org/10.1080/1364557032000119616

Banco Central del Ecuador (BCE). (2024). *Informe macroeconómico anual 2024*. BCE. https://www.bce.fin.ec

CENACE. (2019). *Implementación de sistemas WAMS en Ecuador*. Operador Nacional de Electricidad. https://www.cenace.gob.ec

CENACE. (2023). *Reporte de confiabilidad del Sistema Nacional Interconectado*. Operador Nacional de Electricidad. https://www.cenace.gob.ec

Endsley, M. R. (2025). Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors, 37*(1), 32–64. https://doi.org/10.1518/001872095779049543

Ghosh, S., Srivastava, A., & Kumar, R. (2020). Application of μPMU for distribution system situational awareness. *Electric Power Systems Research, 189*, 106635. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106635

International Energy Agency (IEA). (2023). *Electricity 2023: Analysis and forecast to 2025*. IEA. https://www.iea.org/reports/electricity-2023

Kumar, A., Sharma, S., & Singh, R. (2021). Enhancing distribution system monitoring with micro-PMUs: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 138*, 110512. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110512

Otuoze, A. O., Rabiu, I., & Saidu, A. (2023). Situational awareness in electricity distribution systems with μPMUs: Lessons for sub-Saharan Africa. *Energy Reports, 9*, 2152–2163. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.01.145