

CONESCAPANHONDURAS2025paper160.pdf

 Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)

Document Details

Submission ID

trn:oid:::14348:477701533

Submission Date

Jul 31, 2025, 7:04 PM CST

Download Date

Aug 12, 2025, 6:37 PM CST

File Name

CONESCAPANHONDURAS2025paper160.pdf

File Size

102.8 KB

6 Pages




4,362 Words

28,124 Characters

12% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

Top Sources

- 11%  Internet sources
- 6%  Publications
- 0%  Submitted works (Student Papers)

Integrity Flags




0 Integrity Flags for Review

No suspicious text manipulations found.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.

Top Sources

- 11%  Internet sources
- 6%  Publications
- 0%  Submitted works (Student Papers)

Top Sources

The sources with the highest number of matches within the submission. Overlapping sources will not be displayed.

1	Internet	annals-csis.org	1%
2	Internet	reddis.org	<1%
3	Internet	6487787.fs1.hubspotusercontent-na1.net	<1%
4	Internet	www.mdpi.com	<1%
5	Internet	petroquimex.com	<1%
6	Internet	cdi.mecon.gov.ar	<1%
7	Internet	link.springer.com	<1%
8	Internet	www.energypolicy.columbia.edu	<1%
9	Internet	citdes.utp.ac.pa	<1%
10	Internet	dokumen.pub	<1%
11	Internet	www.slideshare.net	<1%

12	Internet	hdl.handle.net	<1%
13	Internet	tel.archives-ouvertes.fr	<1%
14	Publication	Arnd C. Helmke. "Windenergie in Südamerika", Springer Science and Business Me...	<1%
15	Internet	allaboutrenewables.com	<1%
16	Internet	www.coursehero.com	<1%
17	Internet	www.emo.org.tr	<1%
18	Internet	guies.uab.cat	<1%
19	Internet	dspace.espace.edu.ec	<1%
20	Internet	backend.orbit.dtu.dk	<1%
21	Internet	publications.iadb.org	<1%
22	Internet	repository.unimilitar.edu.co	<1%
23	Internet	stakeholders.com.pe	<1%
24	Internet	trade.ec.europa.eu	<1%
25	Internet	upcommons.upc.edu	<1%

26	Internet	revistas.unipamplona.edu.co	<1%
27	Internet	atos.net	<1%
28	Internet	jsesd-ojs.csers.ly	<1%
29	Internet	repositori.uji.es	<1%
30	Internet	www.bcnenergychallenges.com	<1%
31	Internet	www.gob.mx	<1%
32	Internet	www.itca.edu.sv	<1%
33	Internet	www.mondaq.com	<1%
34	Internet	www.scribd.com	<1%
35	Publication	Ruiz Ortega, Rafael. "Prevencion, resolucion y/o transformacion De Conflictos En ...	<1%

Smart Transformers en Redes de Distribución: Oportunidades y Retos para su Implementación en Latinoamérica

Abstract—The digital transformation of the power sector is reshaping the operation, supervision, and planning of distribution networks. In this context, Smart Transformers emerge as a key technology to achieve greater efficiency, reliability, and flexibility in increasingly dynamic and decentralized systems. By integrating real-time monitoring, control, and communication technologies, these devices enable more responsive and intelligent grid management. In Latin America, the adoption of Smart Transformers represents a strategic opportunity to modernize aging infrastructure, traditionally based on conventional transformers with limited visibility and control. However, their implementation faces significant challenges, including high initial costs, outdated regulations, and technical skill gaps. This paper provides a comprehensive overview of Smart Transformers, highlighting their functionalities, key features, and differences compared to traditional transformers based on a literature review and analysis of regional pilot projects. It also analyzes the opportunities and barriers for their deployment in Latin America, drawing on real-world case studies from Brazil, Mexico, and Colombia. Finally, it outlines future perspectives and strategic actions to facilitate a gradual transition toward a more digital, resilient, and interoperable electrical grid.

Keywords—eficiencia energética, generación distribuida, Latinoamérica, modernización de redes, regulación de voltaje, resiliencia eléctrica, Smart Grids, Smart Transformers.

I. INTRODUCCIÓN.

La transformación digital del sector eléctrico ha generado un cambio paradigmático en la operación, supervisión y planificación de las redes de distribución. En este contexto, los *Smart Transformers* o transformadores inteligentes emergen como componentes clave para alcanzar mayores niveles de eficiencia, confiabilidad y flexibilidad en sistemas eléctricos cada vez más dinámicos y descentralizados. Estos dispositivos integran tecnologías avanzadas de monitoreo, control y comunicación, permitiendo gestionar en tiempo real parámetros operativos críticos y facilitando su integración con plataformas de automatización y gestión de red, como los sistemas SCADA o DMS [1].

En América Latina, la adopción de transformadores inteligentes representa una oportunidad estratégica para modernizar infraestructuras eléctricas que, en su mayoría, fueron diseñadas bajo modelos centralizados con transformadores convencionales, los cuales presentan limitaciones significativas en términos de visibilidad operativa, regulación de voltaje y diagnóstico preventivo. La presión por reducir pérdidas técnicas y no técnicas, mejorar la calidad del servicio e incorporar generación renovable distribuida ha puesto en evidencia

la necesidad de migrar hacia soluciones más inteligentes y adaptativas [2].

No obstante, la implementación de *Smart Transformers* en la región enfrenta desafíos importantes: restricciones presupuestarias, normativas obsoletas, brechas tecnológicas y limitaciones en la capacitación técnica. A pesar de estos obstáculos, la evolución tecnológica y la reducción de costos de sensores, módulos de comunicación y electrónica de potencia, junto con el interés institucional por avanzar hacia redes inteligentes, abren un panorama favorable para su adopción gradual.

Este artículo presenta una visión integral sobre los *Smart Transformers* y su papel en las redes de distribución modernas. Se analizan su funcionamiento, características clave y las diferencias frente a los transformadores tradicionales. Además, se abordan las oportunidades y barreras para su implementación en América Latina, con atención en casos reales de adopción tecnológica en países como Brasil, México y Colombia. Finalmente, se discuten las perspectivas futuras y se proponen estrategias para facilitar una transición efectiva hacia una infraestructura eléctrica más digital, resiliente e interoperable.

II. SMART TRANSFORMERS.

Los *Smart Transformers*, o transformadores inteligentes, se perfilan como una opción estratégica para alcanzar mayores niveles de precisión y eficiencia, elementos clave en la modernización de las redes eléctricas. Su implementación es especialmente relevante en redes de distribución, donde se alinean con el enfoque de mejora continua promovido por el desarrollo de las redes inteligentes (*smart grids*). Estos dispositivos incorporan tecnologías avanzadas de monitoreo, control y comunicación, que permiten una operación más eficiente, flexible y resiliente, todo en tiempo real.

A. Funcionamiento de los Transformadores Convencionales.

Basados en el principio de inducción electromagnética de Faraday, los transformadores eléctricos operan mediante la generación de un campo magnético alterno en un devanado primario, el cual se canaliza a través de un núcleo de hierro, induciendo una tensión en el devanado secundario. Estos dispositivos resultan fundamentales en los sistemas de distribución eléctrica por su capacidad de elevar o reducir niveles de voltaje, adaptándolos a las necesidades de los usuarios finales.

Dada su función crítica en la cadena de suministro de energía, los transformadores deben operar en condiciones óptimas en todo momento para asegurar la calidad y continuidad del servicio eléctrico.

Sin embargo, los transformadores convencionales presentan limitaciones importantes en cuanto al monitoreo de sus parámetros operativos, ya que estos solo pueden ser verificados de manera presencial. Esto no solo representa una exposición a riesgos para el personal técnico (en caso de fallas o condiciones anómalas), sino que también puede comprometer la integridad de uno de los componentes más vitales de la red de distribución [3].

B. Funcionamiento de los Smart Transformers.

Los *Smart Transformers* funcionan integrando tecnologías avanzadas de monitoreo, control y comunicación para gestionar de forma dinámica y eficiente la transformación de voltaje en las redes eléctricas. A diferencia de los transformadores convencionales, estos dispositivos utilizan sensores en tiempo real para medir parámetros eléctricos y ambientales como temperatura, carga, humedad y calidad del voltaje, permitiendo una supervisión continua de su estado operativo [4]. Incorporan electrónica de potencia que les permite regular activamente la tensión de salida, adaptándose a variaciones en la carga o a la presencia de generación distribuida, como paneles solares.

Además, cuentan con sistemas de comunicación bidireccional que utilizan protocolos como IEC 61850, Modbus o tecnologías IoT [5], lo que permite enviar datos a centros de control o plataformas en la nube, y recibir comandos para ajustes automáticos [6], [7].

C. Características de los Smart Transformers.

Entre sus principales características se destacan:

- Monitoreo en tiempo real: Capturan datos eléctricos y ambientales constantemente mediante sensores inteligentes.
- Regulación activa de voltaje: Ajustan automáticamente la tensión de salida según las condiciones de carga.
- Comunicación bidireccional: Transmiten y reciben información mediante protocolos como IEC 61850 o IoT.
- Diagnóstico predictivo: Detectan posibles fallas antes de que ocurran, optimizando el mantenimiento.
- Integración con energías distribuidas: Se adaptan a la presencia de generación solar, eólica y almacenamiento.
- Interoperabilidad con sistemas SCADA/DMS: Se comunican eficazmente con plataformas de gestión de red.
- Mejora de eficiencia y confiabilidad: Reducen pérdidas técnicas y mejoran la calidad del servicio eléctrico.

Gracias a estas capacidades, los transformadores inteligentes no solo mejoran la estabilidad y eficiencia del sistema eléctrico, sino que también permiten implementar estrategias de mantenimiento predictivo, reduciendo el riesgo de fallas y extendiendo la vida útil del equipo.

D. Comparación entre Transformadores Convencionales y Smart Transformers.

Los transformadores convencionales y los *Smart Transformers* presentan diferencias significativas en cuanto a su diseño y funcionalidad, mostrados en la Tabla I. Los primeros requieren monitoreo manual y presencial, lo que limita su capacidad para detectar fallas de forma anticipada, mientras que los transformadores inteligentes permiten un monitoreo en tiempo real gracias a sensores integrados. En cuanto a la regulación de voltaje, los transformadores convencionales operan de forma pasiva, utilizando cambiadores de derivaciones fijos o automáticos, mientras que los inteligentes pueden regular dinámicamente el voltaje mediante electrónica de potencia. La capacidad de diagnóstico también varía notablemente: en los modelos convencionales, las fallas solo pueden detectarse una vez que ocurren, mientras que los *Smart Transformers* emplean análisis predictivos para anticiparse a posibles problemas.

Tabla I
COMPARACIÓN ENTRE TRANSFORMADORES CONVENCIONALES Y SMART TRANSFORMERS

Transformadores convencionales	Conven-	Smart Transformers
Monitoreo manual y local		Monitoreo en tiempo real con sensores
Regulación de voltaje pasiva		Regulación dinámica mediante electrónica de potencia
Diagnóstico reactivo: falla detectada solo al ocurrir		Diagnóstico predictivo: anticipación de fallas
Sin capacidad de comunicación digital		Comunicación bidireccional (IEC 61850, IoT)
Mantenimiento programado (preventivo o correctivo)		Mantenimiento predictivo basado en datos
Poca integración con generación distribuida		Alta integración con DER (paneles solares, baterías)
Tecnología madura y ampliamente implementada		Tecnología emergente con mayores requerimientos tecnológicos
Menor inversión inicial		Mayor inversión inicial pero con beneficios a largo plazo

Los transformadores inteligentes superan muchas de las limitaciones de los modelos convencionales, aunque su implementación implica desafíos como una mayor inversión inicial y requisitos tecnológicos avanzados. No obstante, representan un componente **fundamental para el desarrollo y consolidación de las** redes eléctricas inteligentes del futuro.

E. Transición de los Transformadores Convencionales a los Smart Transformers.

La migración hacia los *Smart Transformers* no solo representa una mejora tecnológica, sino también un cambio de paradigma **en la operación y planificación de las redes** eléctricas. En regiones como Latinoamérica, esta transición plantea oportunidades clave **para mejorar la calidad del servicio y** enfrentar desafíos asociados a la expansión de la demanda y la inclusión de generación distribuida. No obstante,

también implica retos significativos en términos de inversión, capacitación técnica y adecuación normativa.

Esta evolución de los transformadores en redes de distribución puede abordarse en dos etapas principales: la modernización de unidades existentes y la migración hacia transformadores completamente inteligentes. Esta transición escalonada permite una implementación progresiva, considerando las condiciones técnicas y presupuestarias de cada sistema eléctrico.

1) *Modernización de transformadores existentes:* La meta es extender la funcionalidad de transformadores convencionales mediante la incorporación de tecnologías inteligentes, como:

- Instalación de sensores inteligentes, tales como medidores de temperatura, humedad relativa, corriente y contenido de gases disueltos en el aceite dieléctrico, lo cual permite un monitoreo continuo de las condiciones operativas internas y ambientales.
- Adición de módulos de comunicación, como Unidades Terminales Remotas (RTUs) o gateways, **que permiten la transmisión de datos en tiempo real** hacia centros de control o plataformas en la nube.
- Integración a plataformas de monitoreo remoto, facilitando el mantenimiento basado en condición y la detección temprana de anomalías mediante análisis predictivo.

Esta fase constituye una solución intermedia y costo-efectiva para mejorar la confiabilidad y eficiencia sin necesidad de reemplazo inmediato de los equipos.

2) *Migración a transformadores completamente inteligentes:* Implica la sustitución directa de transformadores convencionales por equipos diseñados desde su concepción con funcionalidades inteligentes. Esta etapa representa el punto culminante del proceso de digitalización y automatización de los sistemas de distribución eléctrica.

- Incorporación de electrónica de potencia, que permite una regulación dinámica y precisa **de la tensión de salida,** mejorando **la** estabilidad del sistema **ante** fluctuaciones **de carga.**
- Capacidad **de** operación autónoma, adaptándose en tiempo real a las condiciones de la red y colaborando activamente en la gestión de energía distribuida.
- Integración total a redes inteligentes (Smart Grids), lo que posibilita su interacción con otros dispositivos avanzados, como sistemas de almacenamiento, generación distribuida y cargas controlables.

F. Aplicaciones en Redes de Distribución.

Estos dispositivos permiten el monitoreo en tiempo real de variables críticas, la protección y actuación autónoma ante fallas, y una gestión dinámica del voltaje, especialmente útil en redes con alta penetración de fuentes renovables [8]. Además, ofrecen capacidades avanzadas para detectar sobrecargas y desequilibrios, extender la vida útil de los activos mediante mantenimiento predictivo y crear un gemelo digital para cada transformador.

1) *Confiabilidad y Calidad de Energía:* Permiten detectar y actuar ante anomalías en tiempo real, lo que reduce los tiempos de interrupción y mejora la calidad del suministro. Gracias al monitoreo continuo de variables como temperatura, carga, armónicos y desequilibrios, pueden anticiparse a fallas y realizar acciones correctivas de forma autónoma.

2) *Detección de Sobrecargas y Desequilibrios:* Los Transformadores Inteligentes tienen la capacidad de medir la corriente por fase y detectar desequilibrios o sobrecargas localizadas.

3) *Gestión Eficiente de Activos:* Transforman el enfoque de mantenimiento de reactivo a predictivo mediante sensores integrados y algoritmos que evalúan el estado operativo del transformador. Todo integrado con sistemas SCADA, GIS y plataformas de análisis en la nube.

4) *Adaptabilidad con la Generación Distribuida:* Facilitan una conexión segura y eficiente de fuentes renovables como solar y eólica, ya que, regulan el flujo bidireccional de potencia, filtran armónicos y mejoran el factor de potencia.

5) *Respuesta Rápida ante Fallas:* Detectan perturbaciones como sobrecargas, caídas de tensión o armónicos severos en tiempos del orden de milisegundos, permitiendo una respuesta local e inmediata.

6) *Incremento de la Resiliencia y Confiabilidad Operativa:* Gracias a su capacidad de adaptación en tiempo real y su integración con otros dispositivos inteligentes (IEDs), los Transformadores Inteligentes, aíslan fallas, reconfiguran la red, priorizan cargas críticas y estabilizan parámetros eléctricos.

III. SMART TRANSFORMERS EN LATINOAMÉRICA.

La implementación de *Smart Transformers* en Latinoamérica se encuentra en una etapa inicial pero con un crecimiento constante, impulsada por la necesidad de modernizar infraestructuras eléctricas envejecidas y adaptarse a las nuevas exigencias del sistema energético. En muchos países de la región, las redes eléctricas fueron concebidas bajo un enfoque centralizado, con transformadores convencionales carentes de capacidades de monitoreo y control dinámico. No obstante, la creciente presión por reducir pérdidas técnicas, mejorar la calidad del servicio e incorporar fuentes de energía renovable ha evidenciado las limitaciones de este modelo tradicional.

A pesar de los desafíos estructurales existentes, Latinoamérica también presenta oportunidades únicas que hacen viable y estratégica la adopción de transformadores inteligentes como parte de una transición hacia redes más eficientes, resilientes e inteligentes.

A. Factores que impulsan la transición en Latinoamérica.

La transición hacia los *Smart Transformers* en Latinoamérica responde a una combinación de factores técnicos, económicos, ambientales y regulatorios que están moldeando el futuro de las redes eléctricas en la región [9].

1) *Crecimiento de la demanda energética y urbanización acelerada:* El aumento sostenido del consumo eléctrico, impulsado por la urbanización, la electrificación del transporte y el crecimiento industrial, requiere redes de distribución

más flexibles, eficientes y confiables. Los *Smart Transformers* permiten gestionar mejor estas nuevas cargas y anticipar condiciones críticas del sistema.

2) *Integración de energías renovables y generación distribuida*: Latinoamérica cuenta con un gran potencial en energías renovables como la solar, eólica e hidroeléctrica. La creciente incorporación de estas fuentes variables exige una infraestructura eléctrica capaz de responder dinámicamente a cambios en la generación [10], una función que los *Smart Transformers* están diseñados para cumplir.

3) *Necesidad de mejorar la calidad del servicio*: Muchos países latinoamericanos enfrentan dificultades en términos de calidad de la energía, pérdidas técnicas y fallas frecuentes. El monitoreo en tiempo real y el control activo que ofrecen los *Smart Transformers* permiten identificar problemas antes de que afecten al usuario final, mejorando los índices de continuidad y confiabilidad.

4) *Integración con las Smart Grids*: La modernización de la red eléctrica mediante el concepto de Smart Grid ha sido adoptada por varios gobiernos como una estrategia clave para lograr sostenibilidad y eficiencia energética. En este contexto, los transformadores inteligentes son componentes esenciales para lograr una red automatizada, resiliente y centrada en el usuario.

5) *Disponibilidad de nuevas tecnologías y disminución de costos*: El avance en tecnologías de sensores, comunicación, electrónica de potencia y plataformas IoT ha reducido significativamente los costos de implementación, haciendo más accesible la modernización de los sistemas eléctricos incluso para economías emergentes.

6) *Iniciativas regulatorias y apoyo institucional*: En algunos países de la región, se están desarrollando marcos regulatorios y programas piloto que promueven la digitalización del sistema eléctrico. Organismos multilaterales también han impulsado proyectos de modernización energética, facilitando la adopción de nuevas tecnologías a través de financiamiento y cooperación técnica.

B. Desafíos para su implementación en Latinoamérica.

Factores como los altos costos iniciales, la falta de marcos regulatorios adecuados, la limitada infraestructura digital, la escasez de personal especializado y la resistencia organizacional dificultan su despliegue a gran escala. Además, la ausencia de estándares de interoperabilidad entre tecnologías complica la integración efectiva de estos dispositivos en el ecosistema eléctrico actual. Superar estos obstáculos será clave para avanzar hacia redes más inteligentes, resilientes y sostenibles en la región.

1) *Limitaciones Económicas y Regulatorias*: Aunque los *Smart Transformers* ofrecen beneficios en confiabilidad, eficiencia y gestión de activos, su adopción enfrenta barreras económicas relevantes. Su costo puede ser 3 a 5 veces mayor que el de transformadores convencionales, debido a la electrónica de potencia y sistemas avanzados. Además, la falta de normativas que valoren servicios inteligentes dificulta que

las distribuidoras recuperen la inversión, desincentivando su implementación masiva.

2) *Infraestructura Digital Insuficiente*: Su funcionamiento óptimo requiere redes de comunicación robustas, plataformas SCADA modernas y sistemas de procesamiento en tiempo real, condiciones que no siempre están presentes en Latinoamérica. A esto se suman brechas de ciberseguridad y limitaciones en analítica avanzada, que restringen el aprovechamiento de los datos generados por estos dispositivos.

3) *Capacitación Técnica y Resistencia al Cambio*: Muchas empresas carecen de personal especializado en electrónica de potencia, ciberseguridad y analítica de datos. Además, existe una resistencia cultural a adoptar herramientas digitales y nuevas rutinas operativas, dificultando la transición desde modelos tradicionales.

4) *Interoperabilidad y Estandarización*: La falta de compatibilidad entre fabricantes y la ausencia de normas técnicas aplicadas consistentemente limitan su integración efectiva. La implementación parcial de estándares como IEC 61850 o IEEE 2030.5 provoca fragmentación tecnológica, aumentando los costos y dificultando la escalabilidad de estas soluciones [11].

C. Casos de Estudio en Latinoamérica.

1) *Proyecto Urban Futurability de ENEL en Sao Paulo, Brasil*: ENEL Distribución São Paulo implementó un innovador proyecto que incorpora sensores avanzados y tecnologías de edge-computing en transformadores aéreos ubicados en zonas urbanas densamente pobladas. Este enfoque permitió un monitoreo en tiempo real de variables críticas como temperatura, carga y condiciones eléctricas, facilitando la detección temprana de fallas y la respuesta inmediata ante eventos anómalos. Como resultado, se logró una reducción significativa en los indicadores de interrupción del servicio eléctrico, tales como SAIDI (System Average Interruption Duration Index) y SAIFI (System Average Interruption Frequency Index), mejorando notablemente la confiabilidad y continuidad del suministro en una de las regiones más críticas de la ciudad [12].

2) *Proyectos Piloto Impulsados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), México*: Aunque no existen aún registros documentados de implementación directa de *Smart Transformers*, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) ha promovido iniciativas de modernización en redes de distribución que sientan las bases para su futura integración. Destacan proyectos de actualización de sistemas SCADA y la implementación de agregadores GIDI (Gestión Inteligente de la Demanda e Interconexión), inspirados en modelos exitosos aplicados en Colombia y otras regiones latinoamericanas. Estas acciones buscan fortalecer la digitalización y automatización de la red, mejorar la supervisión remota y sentar un precedente tecnológico que facilite la adopción de tecnologías inteligentes, incluyendo los *Smart Transformers*, en el mediano plazo [13].

3) *Modernización de Redes de Distribución en Zonas Industriales en Colombia*: Empresas líderes como CODENSA y EPM han sido pioneras en la digitalización de redes de distribución, especialmente en áreas industriales donde la

demanda y la complejidad operativa requieren soluciones avanzadas [14]. Entre las iniciativas destacadas se encuentran:

- La instalación de medición avanzada y sensores IoT en redes de media tensión para obtener datos precisos y en tiempo real.
- Proyectos emblemáticos como ISAAC (Inteligencia y Automatización para la Arquitectura de Control) en Antioquia, que establecen arquitecturas integradas para sistemas SCADA/MES con capacidades de procesamiento en tiempo real [15].
- La implementación de monitoreo continuo, mantenimiento predictivo inteligente y detección temprana de anomalías operativas, que contribuyen a optimizar la gestión de activos, reducir tiempos de respuesta ante fallas y mejorar la eficiencia energética.

Estas experiencias reflejan un avance concreto hacia la incorporación de tecnologías inteligentes que, aunque aún no incluyen *Smart Transformers* de manera masiva, preparan el terreno para su futura adopción en redes más robustas y resilientes.

IV. DISCUSIÓN Y PERSPECTIVAS A FUTURO.

La implementación de transformadores inteligentes en Latinoamérica representa una oportunidad estratégica para modernizar los sistemas eléctricos, mejorar la calidad del servicio y avanzar hacia una red más eficiente, resiliente e interoperable [16]. No obstante, su adopción generalizada requiere una visión a mediano plazo, acompañada de políticas públicas coherentes, marcos regulatorios claros y colaboración entre actores clave del sector eléctrico.

A. Viabilidad a Corto y Mediano Plazo.

En el corto plazo, la modernización de transformadores existentes mediante la incorporación de sensores inteligentes, módulos de comunicación y plataformas de monitoreo remoto es una estrategia viable y costo-efectiva. Esto permite obtener beneficios inmediatos como la reducción de tiempos de respuesta ante fallas, mantenimiento predictivo y disminución de pérdidas técnicas [17].

A mediano plazo, la sustitución progresiva por transformadores completamente inteligentes será esencial, especialmente en áreas con alta penetración de generación distribuida o condiciones operativas exigentes. La madurez tecnológica, la disminución de costos de componentes y la mayor disponibilidad de soluciones comerciales hacen factible esta evolución en un horizonte de 5 a 10 años.

B. Rol del Marco Normativo.

La falta de normativas específicas es uno de los principales obstáculos para la adopción de transformadores inteligentes. Muchos países de la región aún operan bajo regulaciones centradas en modelos de red convencionales, lo que limita la inversión en tecnologías emergentes [18]. Por tanto, es fundamental:

- Establecer estándares técnicos y protocolos de comunicación abiertos.

- Incluir incentivos para la digitalización de redes en planes tarifarios y marcos regulatorios.
- Promover esquemas de medición del desempeño que valoren la eficiencia, confiabilidad y flexibilidad de la red.
- Un marco regulatorio adaptativo y alineado con las tendencias de digitalización será clave para atraer inversión y reducir la incertidumbre en los procesos de implementación.

C. Potencial de Colaboración Regional.

Dada la similitud de desafíos técnicos, económicos y regulatorios entre los países latinoamericanos, existe un alto potencial de colaboración regional [19]. Iniciativas multilaterales como las de la CIER, CEPAL o el BID pueden servir como plataformas para compartir experiencias, desarrollar estándares comunes y realizar compras conjuntas que reduzcan costos. Además, los proyectos piloto regionales pueden acelerar la curva de aprendizaje y facilitar el escalamiento de soluciones exitosas.

V. CONCLUSIONES.

Los *Smart Transformers* representan una pieza clave en la evolución de las redes eléctricas hacia esquemas más inteligentes, resilientes y eficientes. Su capacidad para monitorear variables en tiempo real, regular activamente el voltaje, diagnosticar fallas de forma predictiva e integrarse con plataformas digitales los posiciona como una solución avanzada frente a las limitaciones de los transformadores convencionales. En este sentido, su implementación no solo responde a una necesidad tecnológica, sino también estratégica, especialmente en contextos como América Latina, donde la calidad del servicio, las pérdidas técnicas y la integración de generación renovable siguen siendo desafíos persistentes.

Sin embargo, el camino hacia su adopción masiva en la región aún enfrenta barreras importantes. El alto costo inicial, la limitada infraestructura digital, la falta de normativas que valoren los beneficios operativos, y la escasez de personal capacitado son factores que ralentizan su despliegue. A pesar de ello, los casos de estudio analizados —como el proyecto Urban Futurability en Brasil y las iniciativas en Colombia y México— muestran que existen avances concretos y experiencias valiosas que pueden servir como referencia para una transición más amplia.

En este contexto, una estrategia escalonada que combine la modernización de transformadores existentes con la implementación progresiva de unidades completamente inteligentes puede ser una vía viable y eficiente para avanzar. Además, será fundamental fortalecer los marcos regulatorios, promover incentivos financieros, estandarizar protocolos de interoperabilidad y fomentar la capacitación técnica especializada.

En conclusión, los *Smart Transformers* ofrecen una oportunidad real para transformar la infraestructura eléctrica de América Latina. Su adopción, si bien desafiante, es cada vez más factible gracias a la evolución tecnológica, el interés institucional por las redes inteligentes y el creciente valor que

representa una red más flexible, segura y preparada para el futuro energético de la región.

REFERENCIAS

- [1] International Energy Agency, "Latin america energy outlook 2023," <https://www.iea.org/reports/latin-america-energy-outlook-2023>, 2023, accessed: 2025-07-13.
- [2] Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) y SICA, "Estrategia energética sustentable 2030 de los países del sica," CEPAL / SICA, Tech. Rep., 2020, informe marco con metas al 2030; publicado el 16 de noviembre de 2020; datos regionales de países del SICA.
- [3] M. H. Bollen and F. Hassan, *Integration of Distributed Generation in the Power System*. Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press, 2011.
- [4] Y. Yan, Y. Gao, and Y. Ren, "Smart transformer for smart grid: A review," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 4, pp. 1956–1963, 2015.
- [5] M. Cardona and F. E. Serrano, "The fourth industrial revolution and disruptive technologies," in *2023 IEEE 41st Central America and Panama Convention (CONCAPAN XLI)*, 2023, pp. 1–6.
- [6] J. Zhao, W. Wu, and X. Lin, "Advanced monitoring and control strategies for smart transformers in distribution systems," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 12 345–12 358, 2020.
- [7] J. Alvarado, F. Ramos, J. Rosales, M. Cardona, and C. Garzón, "Digitization of electrical energy reading for residential users using iot technology," in *2022 IEEE Central America and Panama Student Conference (CONESCAPAN)*, 2022, pp. 1–4.
- [8] International Renewable Energy Agency (IRENA), "Renewable energy market analysis: Latin america," <https://www.irena.org/Publications/2022/Jan/Renewable-Energy-Market-Analysis-Latin-America>, 2022, accessed: 2025-07-13.
- [9] Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), "Escenarios para la transición energética: Experiencia y buenas prácticas en américa latina y el caribe," IRENA, Tech. Rep., 2022, acceso: 2025-07-13. [Online]. Available: <https://www.irena.org/publications/2022/Jun/Scenarios-for-the-Energy-Transition-LAC-ES>
- [10] C. Tejada and M. Cardona, "Optimization of hybrid renewable energy systems: Integration of solar energy with battery storage for an electric charging station in el salvador," in *2024 IEEE Central America and Panama Student Conference (CONESCAPAN)*, 2024, pp. 1–4.
- [11] IEEE Power & Energy Society, "Roadmap for smart grid interoperability," IEEE Power & Energy Society, 2019, available from: <https://www.ieee-pes.org>.
- [12] "Urban Futurability@ Brazil – Enel." [Online]. Available: <https://archive.wbcsd.org/Programs/Cities-and-Mobility/Sustainable-Cities/Blueprint-for-a-sustainable-built-environment/Net-zero-carbon-and-circular/Urban-Futurability-R-Brazil-Enel>
- [13] K. García, "CFE pretende monitorear toda su red de transmisión," 4 2025. [Online]. Available: <https://www.eleconomista.com.mx/empresas/cfe-pretende-monitorear-toda-red-transmision-20250414-754844.html>
- [14] "Codensa ingresa a la era de la medición inteligente." [Online]. Available: https://www.enel.com.co/es/prensa/news/d201611-codensa-ingresa-a-la-era-de-la-medicin-inteligente.html?utm_source=chatgpt.com
- [15] M. C. Quiroz and Y. E. S. Ramón, "Estudio sobre la implementación de redes eléctricas inteligentes "smart grids" en el departamento del cesar: una revisión," *Revista Semilleros de Investigación*, vol. 3, no. 2, pp. 1–24, 2020.
- [16] International Renewable Energy Agency (IRENA), "Innovation landscape for smart electrification," IRENA, Tech. Rep., 2023, acceso: 2025-07-13. [Online]. Available: <https://www.irena.org/Publications/2023/Jun/Innovation-landscape-for-smart-electrification>
- [17] —, "Smart grids and renewables: A cost-benefit analysis guide for developing countries," IRENA, Tech. Rep., 2015, acceso: 2025-07-13. [Online]. Available: <https://www.irena.org/publications/2015/Oct/Smart-Grids-and-Renewables-A-cost-benefit-analysis-guide-for-developing-countries>
- [18] D. Icaza, D. Vallejo-Ramirez, M. Siguencia, and L. Portocarrero, "Smart electrical planning, roadmaps and policies in latin american countries through electric propulsion systems: A review," *Sustainability*, vol. 16, no. 23, p. 10624, 2024.
- [19] Comisión de Integración Energética Regional (CIER), "Síntesis informativa energética de los países de la cier," CIER, Tech. Rep., 2025, datos actualizados al cierre de 2023; acceso a documento a través de ColombiaInteligente.org.