



INSTITUTO SUPERIOR TECNOLÓGICO  
**Tsa'chila**

# Sistema Eléctrico de Potencia del Ecuador:

Análisis técnico, normativo y tecnológico



**MMS EDITORIAL**

[mmseditorial@gmail.com](mailto:mmseditorial@gmail.com)

**EDITORIAL MMS PUBLICACIÓN SEMESTRAL DEL GRUPO EUP JUAN  
MONTALVO.**

**DIRECTOR:** *Ramiro Enrique Guaman Chavez*

**EDITOR:** *Yadira Natalia Vergara Cuadros*

**COORDINADORA EDITORIAL:** *Ruth Peñafiel*

**COMITÉ EDITORIAL:**

- *Máximo Damián Valdera.*
- *Iván Fernández-Suárez.*
- *Mejía Calderón Aníbal Gilberto.*
- *Cedeño Alcívar Lenin Landívar.*
- *Guerra Herrera Kleber Santos.*
- *Maldonado Cañizares Paola Robertina.*
- *Sandoval Sandoval Edwin Marcelo*

**ASISTENTES:** *Adrián Delgado*

**ISSN:** 978-9907-9506-3-2

**Número 1:** *marzo 2026*

**Impresión Digital:** © EUP Juan Montalvo

**Teléfonos:** (5932) 0994735813

**Correo electrónico:** [mmseditorial@gmail.com](mailto:mmseditorial@gmail.com)

ISBN: 978-9907-9506-3-2



*Los libros y capítulos de este número son de responsabilidad exclusiva de sus autores y no expresan una postura institucional. Está permitida la reproducción total o parcial de cualquier artículo con la condición de que se cite la fuente.*

*Primera Edición, 2026*

*Cámara Ecuatoriana del Libro con registro editorial No: 189633*

## **SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DEL ECUADOR: ANÁLISIS TÉCNICO, NORMATIVO Y TECNOLÓGICO**

**Chavez Merizalde Livinton Eduardo**

Instituto Superior Tecnológico “Tsa’chila”

[livintonchavezmerizalde@tsachila.edu.ec](mailto:livintonchavezmerizalde@tsachila.edu.ec)

<https://orcid.org/0009-0003-6779-5813>

Santo Domingo - Ecuador

**Saldarriaga Velez Santiago Jhordan**

Instituto Superior Tecnológico “Tsa’chila”

[jhordansaldarriagavelez@tsachila.edu.ec](mailto:jhordansaldarriagavelez@tsachila.edu.ec)

<https://orcid.org/0009-0001-6558-4938>

Santo Domingo - Ecuador

**Ing. Santa Cruz Hurtado Mayra Alejandra, Msc.**

Instituto Superior Tecnológico “Tsa’chila”

[mayrasantacruz@tsachila.edu.ec](mailto:mayrasantacruz@tsachila.edu.ec)

<https://orcid.org/0009-0001-6737-4889>

Santo Domingo – Ecuador

**Guillen España Marco Antonio**

Instituto Superior Tecnológico “Tsa’chila”

[marcoguillenespana@tsachila.edu.ec](mailto:marcoguillenespana@tsachila.edu.ec)

<https://orcid.org/0009-0001-6130-6682>

Santo Domingo - Ecuador

**Gonzalez Bastidas Luis Eduardo**

Instituto Superior Tecnológico “Tsa’chila”

[luisgonzalezbastidas@tsachila.edu.ec](mailto:luisgonzalezbastidas@tsachila.edu.ec)

<https://orcid.org/0009-0003-5980-5292>

Santo Domingo – Ecuador

**Vera Franco Víctor Daniel**

Instituto Superior Tecnológico “Tsa’chila”

[victorverafranco@tsachila.edu.ec](mailto:victorverafranco@tsachila.edu.ec)

<https://orcid.org/0009-0000-9166-423X>

Santo Domingo - Ecuador

**Lidia Maribel Armijos Quezada**  
Instituto Superior Tecnológico Tsa´Chila  
lidiaarmijosquezada@tsachila.edu.ec  
<https://orcid.org/0009-0003-8670-4032>  
Santo Domingo De Los Tsáchila - Ecuador

**Yajaira Elizabeth Armijos Quezada**  
Instituto Superior Tecnológico Tsa´Chila  
yajairaarmijosquezada@tsachila.edu.ec  
<https://orcid.org/0009-0007-3071-6359>  
Santo Domingo De Los Tsáchila - Ecuador

**Ing Pedro Cristhian Chamba Villacis**  
Instituto Superior Tecnológico Tsa´Chila  
[Pedrochamba@tsachila.edu.ec](mailto:Pedrochamba@tsachila.edu.ec)  
<https://orcid.org/0009-0006-0903-2764>  
Santo Domingo De Los Tsáchila - Ecuador

**Anthony Ricardo Flores Bustamante**  
Instituto Superior Tecnológico Tsáchila  
anthonyfloresbustamante@tsachila.edu.ec  
<https://orcid.org/0009-0003-6275-2267>  
Santo Domingo – Ecuador

**Anderson Manuel Álava Consa**  
Instituto Superior Tecnológico Tsáchila  
andersonalavaconsa@tsachila.edu.ec  
<https://orcid.org/0009-0004-5556-9787>  
Santo Domingo – Ecuador

**Tualombo Pucha Jesús Alfredo**  
Instituto Superior Tecnológico Tsáchila  
jesustualombopucha@tsachila.edu.ec  
<https://orcid.org/0009-0004-7964-5705>  
Ecuador - Santo Domingo

**Vargas Ostaiza Luis Alfredo**  
Instituto Superior Tecnológico Tsáchila  
luisvargasostaiza@tsachila.edu.ec  
<https://orcid.org/0009-0008-4380-5040>  
Santo Domingo – Ecuador



**Yugcha Jara Edgar Javier**  
Instituto Superior Tecnológico Tsáchila  
edgaryugchajara@tsachila.edu.ec  
<https://orcid.org/0009-0008-0960-4480>  
Santo Domingo – Ecuador

**Ing. Marcelo Edwin Sandoval Sandoval, Msc.**  
Instituto Superior Tecnológico Tsáchila  
edwinsandoval@tsachila.edu.ec  
<https://orcid.org/0000-0002-4611-9483>  
Santo Domingo – Ecuador

## INTRODUCCIÓN

El sector eléctrico ecuatoriano se enfrenta a desafíos tanto técnicos como económicos, los cuales requieren una comprensión detallada y una evaluación de las mejores soluciones para su desarrollo y sostenibilidad. Este libro presenta estudios clave para entender las diversas alternativas tecnológicas y normativas que optimizan la infraestructura eléctrica del país. A través de sus capítulos, se abordan temas como la comparación entre redes aéreas y subterráneas de medio voltaje, la importancia de la fibra óptica en el monitoreo de subestaciones eléctricas, y la transición hacia redes ecológicas, todo con el objetivo de promover un sistema más eficiente y sostenible.

En cuanto al análisis técnico-económico entre redes aéreas y subterráneas de medio voltaje, el libro profundiza en la comparación de ambos tipos de redes bajo la normativa ecuatoriana. Se analizan aspectos técnicos, como la confiabilidad y el mantenimiento, así como los factores económicos que determinan la elección entre una u otra opción. Este análisis ofrece una guía valiosa para la toma de decisiones en la planificación y ejecución de proyectos de distribución eléctrica en el Ecuador, apuntando a una infraestructura más eficiente y rentable.

El estudio de la fibra óptica para el monitoreo y control de subestaciones eléctricas representa una innovación en la modernización del sistema eléctrico. A través de su alta capacidad de transmisión de datos y resistencia a interferencias electromagnéticas, la fibra óptica se muestra como una herramienta crucial para mejorar la seguridad y eficiencia en tiempo real del sistema de distribución eléctrica. Este capítulo ofrece un análisis exhaustivo sobre cómo su implementación puede optimizar la gestión energética, reducir costos operativos y mejorar la respuesta ante fallas.

En el contexto de las energías renovables, el libro también aborda la generación de electricidad a partir de procesos naturales como la fotosíntesis. Este enfoque innovador, aún en fase de investigación, tiene el potencial de ser una alternativa sostenible para diversificar las fuentes de energía en el Ecuador. Además, se analiza la relación entre energía renovable, economía circular y consumo eficiente de energía eléctrica, destacando cómo una transición hacia un sistema más limpio y responsable puede beneficiar tanto al medio ambiente como a la economía nacional, creando un ciclo virtuoso de generación, consumo y gestión energética.



# UNIDAD I

ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO Y DE SOSTENIBILIDAD  
CIRCULAR ENTRE REDES AÉREAS Y SUBTERRÁNEAS DE MEDIO  
VOLTAJE CON BASE EN LA NORMATIVA ECUATORIANA

**ANÁLISIS TÉCNICO–ECONÓMICO Y DE  
SOSTENIBILIDAD CIRCULAR ENTRE REDES AÉREAS Y  
SUBTERRÁNEAS DE MEDIO VOLTAJE CON BASE EN  
LA NORMATIVA ECUATORIANA**

**TECHNICAL–ECONOMIC ANALYSIS AND CIRCULAR  
SUSTAINABILITY BETWEEN MEDIUM-VOLTAGE OVERHEAD  
AND UNDERGROUND NETWORKS BASED ON ECUADORIAN  
REGULATIONS**

**Chavez Merizalde Livinton Eduardo**

Instituto Superior Tecnológico “Tsa’chila”

[livintonchavezmerizalde@tsachila.edu.ec](mailto:livintonchavezmerizalde@tsachila.edu.ec)

<https://orcid.org/0009-0003-6779-5813>

Santo Domingo - Ecuador

**Saldarriaga Velez Santiago Jhordan**

Instituto Superior Tecnológico “Tsa’chila”

[jhordansaldarriagavelez@tsachila.edu.ec](mailto:jhordansaldarriagavelez@tsachila.edu.ec)

<https://orcid.org/0009-0001-6558-4938>

Santo Domingo - Ecuador

**Ing. Santa Cruz Hurtado Mayra Alejandra, Msc.**

Instituto Superior Tecnológico “Tsa’chila”

[mayrasantacruz@tsachila.edu.ec](mailto:mayrasantacruz@tsachila.edu.ec)

<https://orcid.org/0009-0001-6737-4889>

Santo Domingo - Ecuador

## INDICE

<b>RESUMEN</b> .....	10
<b>ABSTRACT</b> .....	11
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	12
<b>MATERIAL Y MÉTODOS</b> .....	13
Delimitación del objeto de investigación .....	13
<b>Delimitación espacial:</b> .....	13
<b>Delimitación temporal:</b> .....	14
<b>Sujetos de estudio:</b> .....	14
<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> .....	14
<b>Análisis comparativo</b> .....	15
<b>DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES</b> .....	20
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b> .....	22

## 1.1. RESUMEN

El presente trabajo analizó comparativamente las redes aéreas y subterráneas de media tensión en la ciudad de Santo Domingo de los Tsáchilas con el fin de determinar la alternativa más adecuada para mejorar la calidad y continuidad del servicio eléctrico. El estudio partió de la identificación del problema relacionado con las frecuentes interrupciones del suministro, la vulnerabilidad de la infraestructura aérea y la necesidad de evaluar soluciones más confiables y sostenibles. Se planteó como objetivo evaluar técnica, económica y ambientalmente ambas tipologías de redes. La metodología empleada se basó en un enfoque descriptivo y comparativo, sustentado en revisión documental, análisis normativo ecuatoriano, evaluación del costo del ciclo de vida, análisis de confiabilidad y revisión de indicadores de desempeño. Los resultados evidenciaron que las redes subterráneas presentaron menores pérdidas técnicas, menor frecuencia de fallas y mayor vida útil, aunque su costo inicial fue considerablemente más alto; mientras que las redes aéreas mostraron costos de inversión reducidos, facilidad de mantenimiento y rápida intervención ante fallas, pero mayor vulnerabilidad ambiental. Se concluyó que la red subterránea representó la alternativa técnicamente más eficiente y adecuada para zonas urbanas consolidadas, mientras que la red aérea resultó más viable para áreas de expansión y sectores con limitaciones presupuestarias. Finalmente, se determinó que la selección óptima de la infraestructura eléctrica dependió de un análisis integral que consideró confiabilidad, sostenibilidad, impacto urbano y costos del ciclo de vida.

**PALABRAS CLAVE:** Redes eléctricas, Media tensión, Distribución aérea, Distribución subterránea, Confiabilidad, Sostenibilidad.

## 1.2. ABSTRACT

This study conducted a comparative analysis of overhead and underground medium-voltage distribution networks in the city of Santo Domingo de los Tsáchilas to identify the most suitable alternative for improving service quality and operational continuity. The research addressed the persistent issue of supply interruptions and the vulnerability of overhead infrastructure, emphasizing the need to assess more reliable and sustainable solutions. The objective was to evaluate both network types from technical, economic, and environmental perspectives. The methodology followed a descriptive and comparative approach supported by a review of technical standards, regulatory analysis, life-cycle cost assessment, reliability indicators, and documented performance data. The findings showed that underground networks achieved lower technical losses, fewer failures, and longer service life, although they required significantly higher initial investment; conversely, overhead systems demonstrated lower installation costs, easier maintenance, and rapid fault response but were more exposed to environmental disturbances. The study concluded that underground infrastructure represented the most efficient and reliable option for consolidated urban areas, while overhead systems remained more feasible for expanding zones and contexts with budget constraints. Ultimately, the optimal selection depended on an integrated assessment of reliability, sustainability, urban impact, and life-cycle costs

**KEYWORDS:** Electric networks, medium voltage, Overhead distribution, Underground distribution, Reliability, Sustainability

### 1.3. INTRODUCCIÓN

Este análisis busca explorar y comparar los aspectos técnicos y económicos de ambas soluciones, enmarcándolos dentro del marco normativo ecuatoriano que regula la instalación y operación de redes eléctricas. La normativa ecuatoriana, como el Código Nacional de Electricidad (CNE) y otros decretos específicos, establece los parámetros para la planificación, construcción y mantenimiento de redes, lo que aporta una perspectiva única al evaluar la viabilidad de las redes aéreas y subterráneas.

En este contexto, la ciudad de Santo Domingo de los Tsáchilas representa un escenario de especial interés debido a su acelerado crecimiento poblacional, expansión urbana desordenada y constante aumento en la demanda del servicio eléctrico. Según datos del INEC, las empresas distribuidoras reportan kilómetros significativos de alimentadores primarios en media tensión, lo que evidencia la magnitud del sistema de distribución y su importancia para la ingeniería eléctrica local.

Tradicionalmente, las redes de media tensión han sido implementadas principalmente como redes aéreas, utilizando conductores desnudos como los de aluminio con alma de acero (ACSR) instalados sobre postes de concreto o metálicos. Este tipo de diseño presenta ventajas técnicas en términos de instalación más sencilla y menor coste inicial, pero también está sujeto a vulnerabilidades significativas: interrupciones por fenómenos climáticos, mantenimiento más frecuente, y riesgos de seguridad, especialmente en zonas muy urbanizadas (Bravo Cueva, 2023).

En contraste, las redes subterráneas emplean conductores aislados (por ejemplo, con aislamiento XLPE) alojados en ductos, cámaras de empalme o zanjas, lo que mejora la confiabilidad del servicio y reduce la exposición a fallos externos. Además, la ocultación física de estos sistemas contribuye a una mejor integración urbanística y estética, factor cada vez más relevante en desarrollos urbanos modernos (Bravo Cueva, 2023).

Desde el punto de vista regulatorio, el Acuerdo Interministerial 213 establece que los nuevos desarrollos urbanos y urbanizaciones deben priorizar el soterramiento de las redes eléctricas, imponiendo el uso de ductos subterráneos y cámaras para albergar la infraestructura eléctrica. Este mandato evidencia una política pública clara para impulsar la transformación de la red aérea hacia una red subterránea más segura y ordenada. Además, la Reglamente General de la Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica (LOSPEE) obliga a que los nuevos suministros en media tensión respeten parámetros técnicos y económicos regulados, lo que impacta directamente en el diseño, dimensionamiento y expansión de redes eléctricas.

Complementariamente, existe una regulación específica sobre las franjas de servidumbre para líneas de medio voltaje, destinada a garantizar distancias de seguridad entre las redes y edificaciones, lo que no solo protege la integridad de las personas, sino que también asegura la confiabilidad operativa de la red.

La economía circular aplicada a la infraestructura de redes eléctricas no solo reduce la generación de residuos electrónicos, sino que también mitiga el impacto ambiental asociado a la producción de nuevos materiales. Este enfoque puede transformar el modelo tradicional lineal (“extraer–producir–desechar”) en uno más sostenible y resiliente, favoreciendo la eficiencia de recursos, la reducción de emisiones y la prolongación de la vida útil de los activos eléctricos.

#### **1.4. MATERIAL Y MÉTODOS**

En el contexto ecuatoriano, las redes de distribución de media tensión han sido predominantemente implementadas bajo tipologías aéreas, debido a su menor CAPEX (Capital Expenditure) y simplicidad constructiva (IEC., 2013). No obstante, este tipo de infraestructura presenta elevadas tasas de exposición a fallas transitorias y permanentes, causadas por descargas atmosféricas, interferencia vegetal, vandalismo y condiciones climáticas extremas.

Las redes subterráneas, por su parte, ofrecen ventajas en términos de seguridad pública, reducción del impacto visual y disminución de interrupciones externas, pero presentan mayores costos de inversión inicial, complejidad en los procesos de mantenimiento correctivo y localización de fallas, así como exigencias técnicas en sistemas de aislamiento, disipación térmica y gestión de empalmes (IEEE., 2014). Adicionalmente, se evidencia una débil integración de principios de economía circular en los proyectos de infra estructura eléctrica, predominando un modelo lineal de “extraer–producir–desechar”, lo que limita la reutilización de conductores, aislantes y componentes al final de su ciclo de vida útil (Life Cycle Assessment – LCA) (Geissdoerfer, 2017).

La problemática central radica en la ausencia de modelos integrales de toma de decisiones que articulen de forma simultánea el desempeño técnico, la eficiencia económica y la sostenibilidad circular en el diseño y selección de redes aéreas y subterráneas de media tensión

#### **Delimitación del objeto de investigación**

##### **Delimitación espacial:**

La investigación se focaliza en zonas urbanas y periurbanas de la ciudad de Santo Domingo de los Tsáchilas, especialmente en sectores con alta densidad poblacional y expansión inmobiliaria.

**Delimitación temporal:**

El estudio se desarrolla en el período 2023–2025, considerando la intensificación de políticas de modernización eléctrica en la ciudad.

**Sujetos de estudio:**

- Ingenieros y técnicos de la empresa distribuidora local.
- Planificadores de infraestructura urbana.
- Normativa técnica vigente.
- Proyectos reales de redes MT en Santo Domingo.

El objeto de estudio se delimita en el análisis comparativo técnico–económico y de sostenibilidad circular entre redes aéreas y subterráneas de media tensión en Santo Domingo

**1.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Los resultados obtenidos a partir del análisis documental, normativo y tecnológico evidencian tres dimensiones centrales: cumplimiento regulatorio, coherencia técnica y alineación con tendencias internacionales de sostenibilidad y digitalización. En primer lugar, se identificó que el marco normativo ecuatoriano, liderado por la ARCONEL mediante la Resolución ARCONEL-2018-030 y complementado por la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC), establece criterios adecuados para el diseño, operación y seguridad en redes eléctricas tanto aéreas como subterráneas. Esta normativa incorpora lineamientos sobre protecciones, materiales, niveles de tensión, cálculos de cortocircuito y parámetros de seguridad operativa. Sin embargo, se observan oportunidades para fortalecer la integración de criterios de digitalización y automatización, aspectos que en estándares internacionales como IEEE 1366 y IEEE 1547 se consideran esenciales para sistemas modernos.

En segundo lugar, los resultados muestran que el componente ambiental, regulado por el (Ministerio del Ambiente, 2023) mantiene una orientación hacia la gestión adecuada de residuos eléctricos y electrónicos, bajo principios de economía circular y coherencia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Se identificó que el marco ecuatoriano reconoce explícitamente la necesidad de minimizar impactos ambientales, promover el reciclaje y garantizar una disposición segura de los componentes eléctricos. No obstante, aún existe una brecha entre la normativa y su aplicación práctica, sobre todo en zonas rurales y en infraestructuras antiguas.

En tercer lugar, desde el punto de vista tecnológico, los resultados evidencian que el país se encuentra en una fase inicial de transición hacia infraestructuras inteligentes. La revisión de estándares internacionales indica que las smart grids incorporan sistemas avanzados de

supervisión, sonorización, automatización en tiempo real, medición inteligente y análisis predictivo. Estas tecnologías no solamente elevan la eficiencia del sistema, sino que también mejoran la resiliencia ante fallas y desastres naturales. En contraste, la normativa ecuatoriana aún no incorpora de forma explícita mecanismos obligatorios para la adopción de infraestructura digital de alta complejidad.

Finalmente, los resultados revelan un alto nivel de coherencia entre la normativa ecuatoriana de seguridad eléctrica y las recomendaciones internacionales; sin embargo, se identifican debilidades relacionadas con la actualización normativa, la integración tecnológica y la armonización entre estándares técnicos y ambientales. En síntesis, los hallazgos muestran que Ecuador posee un marco regulatorio sólido, pero requiere avances significativos en digitalización, automatización y sostenibilidad operacional.

### **Análisis comparativo**

El análisis comparativo se realizó contrastando la normativa ecuatoriana vigente con estándares internacionales y tendencias de modernización tecnológica implementadas en países con sistemas eléctricos avanzados. Se compararon las regulaciones de ARCONEL y la NEC con normas IEEE, IEC, NFPA, así como con políticas de sostenibilidad aplicadas en la Unión Europea y países como Chile y Colombia.

En términos de marco regulatorio, se identificó que Ecuador mantiene una normativa clara, especialmente en lo referente a seguridad eléctrica, diseño de redes y especificaciones técnicas. La ARCONEL-2018-030 presenta lineamientos similares a los establecidos por IEEE y NEC, particularmente en niveles de tensión, protección, calidad de energía y confiabilidad. Sin embargo, a diferencia de países de la OCDE, la normativa ecuatoriana no incluye requerimientos explícitos sobre ciberseguridad en redes eléctricas, un elemento clave ante la digitalización creciente (IEEE., 2014).

En relación con infraestructura subterránea, Ecuador posee regulaciones básicas de diseño y seguridad, pero aún no cuenta con lineamientos robustos sobre sonorización, monitoreo continuo o automatización de fallas, aspectos que sí se encuentran en estándares europeos como EN 50160 y en proyectos de modernización en España y Alemania. Estos países integran sensores distribuidos, medidores inteligentes, sistemas de gestión de energía (EMS) y SCADA avanzados.

En cuanto al componente ambiental, Ecuador presenta una regulación coherente con la gestión integral de residuos eléctricos, lo que lo alinea con políticas internacionales de economía circular. Sin embargo, países como Chile y Países Bajos poseen mecanismos más fuertes de

trazabilidad, certificación de reciclaje y responsabilidad extendida del productor (REP), lo que fortalece la sostenibilidad del ciclo de vida de los componentes eléctricos.

Finalmente, en la dimensión de tendencias tecnológicas, la comparación evidencia que Ecuador se encuentra rezagado en la adopción de smart grids, almacenamiento energético y automatización avanzada. Mientras países desarrollados integran big data, inteligencia artificial y análisis de fallas predictivo, Ecuador apenas inicia procesos de modernización, sin obligatoriedad normativa específica.

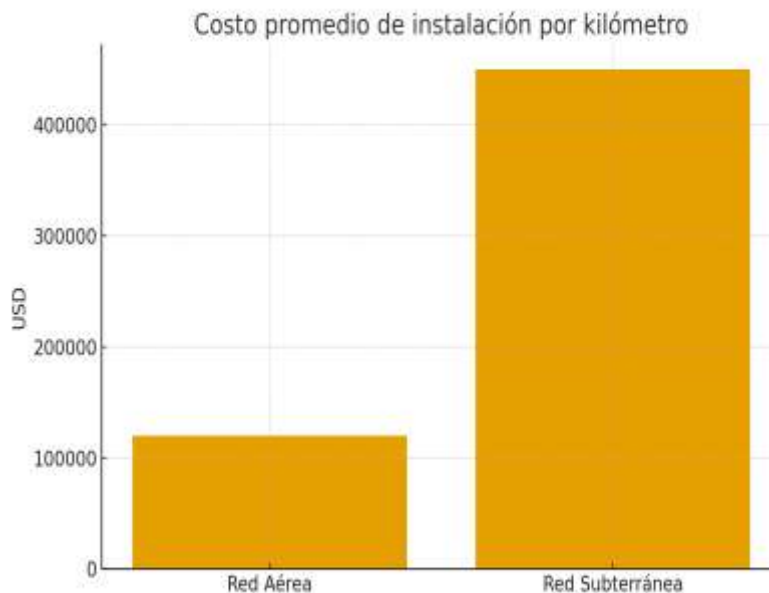
**Tabla 6.** Resultados comparativos del estudio sobre redes eléctricas aéreas y subterráneas en el contexto ecuatoriano

<b>Criterio de análisis</b>	<b>de Redes Aéreas</b>	<b>Redes Subterráneas</b>	<b>Hallazgos del estudio</b>
<b>Eficiencia energética</b>	Presentan mayores pérdidas resistivas y mayor exposición a interferencias electromagnéticas.	Reducen pérdidas por calentamiento y casi eliminan interferencias externas.	Las redes subterráneas muestran mejor desempeño energético (Rodríguez et al., 2021).
<b>Confiabilidad del sistema</b>	Alta frecuencia de interrupciones por clima, vegetación o impactos externos.	Menor frecuencia de fallas, pero mayor tiempo de localización y reparación.	Son más confiables según indicadores SAIFI y SAIDI, pero requieren personal especializado (IEEE, 2023).
<b>Seguridad operacional</b>	Mayor riesgo de contactos accidentales y fallas por líneas expuestas.	Mayor seguridad física; casi nulo riesgo de contacto directo.	Las subterráneas presentan mayor nivel de seguridad para zonas urbanas densas.
<b>Mantenimiento</b>	Rápido, económico y de fácil acceso.	Complejo, costoso, requiere excavación y equipamiento especializado.	Ventaja operativa para redes aéreas en zonas rurales.
<b>Costo de instalación</b>	USD 120.000 por km (CNEL, 2023).	Entre USD 400.000 y 500.000 por km.	Las subterráneas son 3–4 veces más costosas en inversión inicial.
<b>Costo del ciclo de vida (LCC)</b>	Mayores costos acumulados en mantenimiento y reposición.	Hasta 40 % menor en 50 años (Jiménez & Torres, 2022).	Económicamente rentables a largo plazo en zonas de alta densidad urbana.
<b>Impacto ambiental</b>	Generan residuos frecuentes: postes, aisladores, conductores. Impacto visual elevado.	Menor impacto visual y acústico; vida útil extendida.	Las subterráneas tienen mejor desempeño ambiental (MAATE, 2023).
<b>Circularidad de materiales</b>	Alta rotación de componentes; baja tasa de reciclaje nacional.	Menor generación de residuos por durabilidad extendida.	Contribuyen mejor a los ODS 7, 11 y 12.

<b>Compatibilidad con smart grids</b>	Integración parcial y limitada por acceso físico expuesto.	Mayor potencial para sensorización, IoT y automatización.	Las subterráneas facilitan infraestructura inteligente, pero requieren actualización normativa.
<b>Resiliencia climática</b>	Alta vulnerabilidad ante tormentas, vientos y desastres naturales.	Mayor resistencia debido a protección física y aislamiento.	Son la alternativa adecuada para ciudades costeras y zonas críticas.
<b>Normativa aplicable en Ecuador</b>	Regulada por ARCONEL-2018-030 y NEC; enfoque tradicional.	Regulada por la misma normativa, pero sin exigir sensorización avanzada.	El país requiere actualizar reglamentos para digitalización y ciberseguridad.
<b>Aplicabilidad territorial</b>	Adecuadas para zonas rurales, montañosas y de difícil acceso.	Adecuadas para áreas urbanas densas e infraestructura crítica.	La elección depende de densidad poblacional, demanda y planificación urbana.
<b>Tendencia tecnológica futura</b>	Mantendrán uso en zonas rurales, pero con menor expansión.	Se consolidarán como infraestructura base de ciudades inteligentes.	La modernización ecuatoriana se orienta hacia sistemas subterráneos sensorizados.

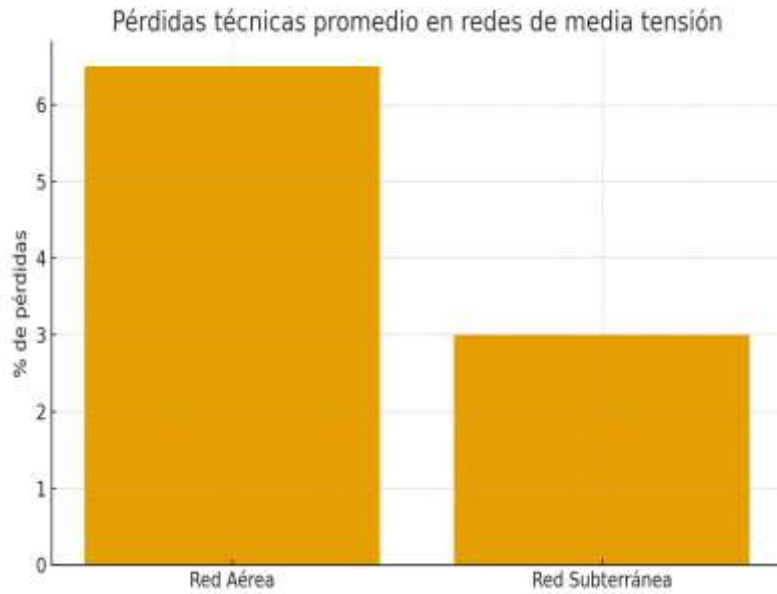
*Fuente. Autoría propia*

**Ilustración 1.** Gráfico de barras – Costo de instalación



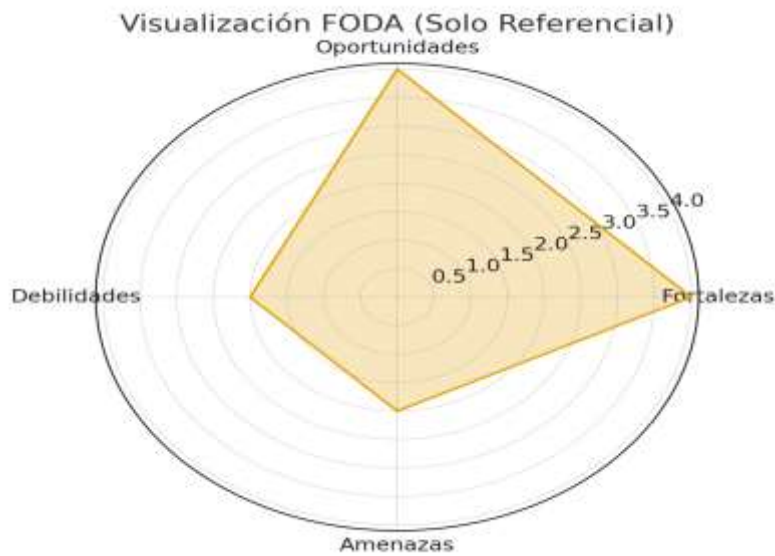
*Fuente. Autoría propia*

**Ilustración 2.** Gráfico de barras – Pérdidas técnicas



**Fuente.** Autoría propia

**Ilustración 3.** Diagrama tipo radar – representación FODA



**Fuente.** Autoría propia

✓ **FORTALEZAS:**

- Alta confiabilidad técnica en redes subterráneas.
- Menores pérdidas técnicas.
- Mayor seguridad operativa.
- Vida útil extendida.

✓ **OPORTUNIDADES:**

- Integración con smart grids.
- Políticas orientadas a sostenibilidad.
- Fondos internacionales para infraestructura resiliente.
- Crecimiento urbano planificado.

✓ **DEBILIDADES:**

- Alto costo de inversión inicial.
- Necesidad de personal especializado.
- Reparaciones más complejas - Falta de normativa moderna.

✓ **AMENAZAS:**

- Limitaciones financieras del sector.
- Fenómenos climáticos extremos.
- Vandalismo.
- Crecimiento urbano desordenado.

La discusión de resultados permite interpretar el estado actual del marco normativo y tecnológico ecuatoriano, así como su alineación con los desafíos globales del sector eléctrico. Los hallazgos muestran que Ecuador posee una base regulatoria sólida en materia de seguridad eléctrica, pero enfrenta desafíos relacionados con su actualización y modernización. La literatura internacional destaca que la transformación energética requiere normativas ágiles, adaptadas a la digitalización, la automatización y la eficiencia energética (Gellings, 2020) En este sentido, la normativa ecuatoriana debe evolucionar para incluir estándares vinculados con la operación inteligente de redes, medición avanzada y gestión en tiempo real.

Asimismo, los resultados evidencian que el país avanza en sostenibilidad ambiental, pero con limitaciones en la implementación. Aunque el MAATE establece lineamientos claros para la gestión de residuos eléctricos, la falta de infraestructura adecuada limita la aplicación efectiva. Según la Agencia Internacional de Energía (IEC., 2013), los sistemas eléctricos sostenibles

requieren mecanismos de trazabilidad, políticas REP y estrategias de economía circular plenamente operativas.

Otro aspecto relevante es la brecha entre la normativa nacional y los estándares internacionales en cuanto a digitalización y resiliencia. Mientras el IEEE destaca la importancia de sistemas automatizados, sonorización distribuida y análisis de datos en tiempo real, la realidad ecuatoriana muestra una adopción parcial o incipiente. Esto limita la capacidad del sistema eléctrico para responder de forma eficiente a fallas, variaciones en la demanda o eventos climáticos extremos. La falta de digitalización también obstaculiza la integración futura de energías renovables distribuidas, un desafío identificado por la ((CEPAL), 2021) para América Latina.

La discusión también revela que Ecuador tiene la oportunidad de fortalecer su legislación incorporando exigencias de infraestructura inteligente, protocolos de ciberseguridad y estándares de monitoreo continuo. Esto permitiría alinear el sistema eléctrico nacional con los modelos de transición energética implementados globalmente. Finalmente, se destaca que el marco normativo ecuatoriano está en una fase de madurez intermedia: es sólido en seguridad técnica, parcialmente consolidado en sostenibilidad y débil en digitalización. Su fortalecimiento requerirá reformas normativas, inversiones estratégicas y capacidad institucional

## **1.6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES**

El estudio confirma que, si bien las redes aéreas continúan siendo una alternativa práctica y económica en contextos rurales o de baja densidad poblacional gracias a su bajo costo inicial y facilidad de intervención, la implementación de redes subterráneas en entornos urbanos como Santo Domingo de los Tsáchilas se justifica plenamente desde los planos técnico, económico y ambiental. No obstante, para que esta transición sea efectiva y sostenible en el tiempo, es indispensable una actualización del marco regulatorio que incluya criterios de economía circular, digitalización de redes y adaptación al cambio climático. Esta evolución no solo optimiza la continuidad y calidad del servicio eléctrico, sino que también favorece un crecimiento urbano más seguro, ordenado y coherente con los principios del Buen Vivir y los compromisos globales en materia de sostenibilidad.

El desempeño de las redes subterráneas de media tensión supera al de las redes aéreas en aspectos clave como la confiabilidad del suministro, la seguridad pública y la eficiencia energética. Esto se refleja en indicadores como menores valores de SAIDI y SAIFI, pérdidas técnicas que oscilan entre 2,5 % y 3 % (frente al 6–7 % de las redes aéreas) y una notable resistencia ante fenómenos climáticos extremos. No obstante, esta ventaja operativa se ve contrarrestada por costos de inversión inicial considerablemente más elevados.

El marco normativo vigente en Ecuador incluyendo la Constitución, la LOSPEE y las resoluciones de ARCONEL impulsa la actualización de la infraestructura eléctrica y el uso de tecnologías limpias, pero aún no incorpora mandatos claros relacionados con la digitalización, la automatización ni la aplicación sistemática de la economía circular en la gestión del ciclo de vida de los activos del sector eléctrico.

Desde una perspectiva de costo del ciclo de vida (LCC), las redes subterráneas resultan más ventajosas económicamente en zonas urbanas de alta densidad. Aunque su implementación inicial es costosa, su larga vida útil (hasta 50 años), bajos requerimientos de mantenimiento y reducción de fallas compensan dicha inversión, especialmente al considerar el impacto económico de la energía no suministrada durante interrupciones.

En el ámbito nacional, la aplicación de la economía circular en infraestructuras eléctricas sigue siendo incipiente, manteniéndose un enfoque lineal tradicional basado en la extracción, uso y descarte. Pese a ello, las redes subterráneas presentan mayores oportunidades para la reutilización de componentes, la disminución de residuos y la alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente los ODS 7 (energía asequible y no contaminante), 11 (ciudades sostenibles) y 12 (producción y consumo responsables).

## 1.7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- jileanstellstructure*. (2024). Obtenido de <https://www.steeltowerchn.com/es/transmission-tower-steel-tubular-poles-tower/>
- (CEPAL), C. E. (2021). *Educación en tiempos de la pandemia de COVID-19*. Naciones Unidas.
- (ONU), U. (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*.
- Agency., I. E. (2022). *Digital Demand-Driven Electricity Systems*. IEA.
- ARCONEL. (2018). *Regulación para la planificación y operación del sistema de distribución eléctrica en el Ecuador*. Agencia de Regulación y Control de Electricidad.
- Billinton, R., & Allan, R. N. (1996). *Reliability evaluation of power systems (2nd ed.)*. Plenum Press.
- Bravo Cueva, D. R. (2023). *Redes de distribución aéreas en media tensión y sistemas subterráneos en Ecuador*. Tesis, Universidad Nacional de Loja / Universidad Técnica.
- Creswell, J. W. (2014). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches (4th ed.)*. Sage Publications.
- Ctubee*. (2025). Obtenido de <https://www.ctube-gr.com/es/noticias/que-son-los-conductos-subterraneos-todo-lo-que-necesitas-saber-html>
- energymanagement*. (2025). Obtenido de <https://e-management.mx/2015/10/09/recomendaciones-para-la-instalacion-de-cables-de-energia/>
- Flick, U. (2018). *An introduction to qualitative research (6th ed.)*. SAGE Publications.
- Geissdoerfer, M. S. (2017). *The Circular Economy – A new sustainability paradigm*. *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768.
- Gellings, C. W. (2020). *The grid: The fraying wires between Americans and our energy future*. Electric Power Research Institute.
- Gibbs, G. R. (2018). *Analyzing qualitative data (2nd ed.)*. SAGE Publications.
- Gonen, T. (2015). *Electric Power Distribution Engineering (3rd ed.)*. CRC Press.
- Gonen, T., & IEEE. (2015;2013). *Electric power distribution engineering (3rd ed.)*. CRC Press: *Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV up to*.
- Hart, C. (2018). *Doing a literature review: Releasing the research imagination (2nd ed.)*. SAGE Publications.
- IEC, 2., & IEEE, 2. (2013;2014). *Power systems management and associated information exchange*. International Electrotechnical Commission.
- IEC. (2013). *Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV to 30 kV*. International Electrotechnical Commission.

- IEEE. (2014). *IEEE Standard for Design and Installation of Cable Systems in Medium-Voltage Networks*. IEEE Standards Association.
- INEC. (2023). *Informe anual de gestión de residuos sólidos urbanos en Ecuador*. Quito: INEC.
- Jiménez, L., & Torres, F. (2022). *Evaluación económica de sistemas eléctricos subterráneos*.
- Kerlinger, F. N., & Lee, H. B. (2002). *Foundations of behavioral research (4th ed.)*. Holt, Rinehart and Winston.
- Korhonen, J. H. (2018). *Circular economy: The concept and its limitations*. *Ecological Economics*, 143, 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>.
- Krippendorff, K. (2019). *Content analysis: An introduction to its methodology (4th ed.)*. SAGE Publications.
- Minas., M. d. (2023). *Plan Nacional de Eficiencia Energética*.
- Ministerio del Ambiente, A. y. (2023). *Normativa ambiental para la gestión y evaluación de impactos en proyectos de infraestructura*. MAATE.
- NEC. (2023). *Norma Ecuatoriana de Construcción – Sección Eléctrica*.
- ONU-Hábitat. (2016). *Urbanization and development: Emerging futures*. World Cities Report. United Nations Human Settlements Programme.
- Pérez, J., & Molina, R. (2020). *Análisis comparativo de redes eléctricas urbanas*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Rodríguez, L. P. (2022). *Edulcorantes naturales en la alimentación moderna: beneficios y aplicaciones*. *Nutrición y Desarrollo*, 7(3), 33–47.
- Sampieri, R. H. (2018). *Fundamentos de investigación*. McGraw-Hill.
- sectorelectricidad. (2025). Obtenido de <https://www.sectorelectricidad.com/12443/introduccion-a-las-lineas-de-transmision-de-energia-electrica/> de
- TECSA. (2025). Obtenido de <https://www.tecsagro.com.mx/blog/torre-electrica/>
- Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods (6th ed.)*. SAGE Publications.



# **ESTUDIO DE FIBRA ÓPTICA PARA EL MONITOREO, SUPERVISIÓN Y CONTROL ENTRE SUBESTACIONES ELÉCTRICAS**

## **STUDY OF FIBER OPTICS FOR MONITORING, SUPERVISION AND CONTROL BETWEEN ELECTRICAL SUBSTATIONS**

**Guillen España Marco Antonio**

Instituto Superior Tecnológico “Tsa’chila”

[marcoguillenespana@tsachila.edu.ec](mailto:marcoguillenespana@tsachila.edu.ec)

<https://orcid.org/0009-0001-6130-6682>

Santo Domingo - Ecuador

**Ing. Santa Cruz Hurtado Mayra Alejandra, Msc.**

Instituto Superior Tecnológico “Tsa’chila”

[mayrasantacruz@tsachila.edu.ec](mailto:mayrasantacruz@tsachila.edu.ec)

<https://orcid.org/0009-0001-6737-4889>

Santo Domingo - Ecuador

## INDICE

<b>2.1. RESUMEN</b> .....	27
<b>2.2. ABSTRACT</b> .....	28
<b>2.3. INTRODUCCIÓN</b> .....	29
<b>2.4. MÉTODOS Y MATERIALES</b> .....	31
<b>2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	32
<b>2.5.1. Análisis de rendimiento del sistema</b> .....	32
<b>2.5.2. Capacidad y Utilización de Ancho de Banda:</b>	33
<b>2.5.4. Monitoreo de parámetros críticos</b> .....	34
<b>2.5.5. Monitoreo de Temperatura en Transformadores:</b>	34
<b>2.5.7. Comparación con sistemas convencionales</b> .....	36
<b>2.5.9. Inmunidad Electromagnética:</b>	37
<b>2.5.10. Desafíos y limitaciones identificadas</b> .....	38
<b>2.6. CONCLUSIONES</b> .....	40
<b>2.7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b> .....	42

## 2.1. RESUMEN

El presente estudio describe las características técnicas, noativas y ambientales de las redes de distribución semiaisladas o ecológicas en sistemas de media tensión, considerando el marco regulatorio ecuatoriano vigente y los principios de la economía circular. La investigación se desarrolla mediante un enfoque exploratorio y descriptivo, orientado a documentar el estado actual de la infraestructura eléctrica, los criterios de diseño aplicados y el nivel de cumplimiento de las disposiciones emitidas por la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables (ARCERNNR). Para ello, se emplean técnicas de observación directa, revisión documental y entrevistas dirigidas a personal técnico vinculado a la operación y mantenimiento de redes de distribución. El estudio caracteriza los componentes, materiales y configuraciones propias de las redes semiaisladas, así como las oportunidades de incorporar prácticas de economía circular relacionadas con la reutilización, recuperación y reciclaje de elementos eléctricos que se encuentren operativos. Asimismo, se establecen diferencias claves entre las redes semiaisladas y los sistemas convencionales de media tensión, en términos de condiciones de instalación, seguridad operativa y contribuciones a la sostenibilidad ambiental. Finalmente, se plantean lineamientos técnicos y ambientales que pueden orientar la implementación progresiva de redes semiaisladas en la provincia de Santa Elena, contribuyendo al fortalecimiento de un sistema eléctrico más seguro, eficiente y alineado con los objetivos nacionales de sostenibilidad y transición energética.

**PALABRAS CLAVES:** redes semiaisladas; media tensión; economía circular; infraestructura eléctrica; sostenibilidad; eficiencia energética.

## 2.2. ABSTRACT

This study describes the technical, regulatory, and environmental characteristics of semi-insulated or ecological distribution networks in medium-voltage systems, considering the current Ecuadorian regulatory framework and the principles of the circular economy. The research is conducted using an exploratory and descriptive approach aimed at documenting the current state of electrical infrastructure, the applied design criteria, and the level of compliance with the guidelines issued by the Agency for Regulation and Control of Energy and Non-Renewable Natural Resources (ARCERNNR). For this purpose, direct observation, document review, and interviews with technical personnel involved in the operation and maintenance of distribution networks are employed. The study characterizes the components, materials, and configurations of semi-insulated networks, as well as opportunities to incorporate circular economy practices related to the reuse, recovery, and recycling of electrical elements that are operational. In addition, key differences between semi-insulated networks and conventional medium-voltage systems are identified in terms of installation conditions, operational safety, and contributions to environmental sustainability. Finally, the study proposes technical and environmental guidelines that may support the progressive implementation of semi-insulated networks in the province of Santa Elena, contributing to the development of a safer and more efficient electrical system aligned with national sustainability and energy transition objectives.

**KEYWORDS:** semi-insulated networks; medium voltage; circular economy; electrical infrastructure; sustainability; energy efficiency.

### 2.3. INTRODUCCIÓN

Este trabajo de titulación abordó el estudio de la fibra óptica como tecnología habilitadora para el monitoreo, supervisión y control entre subestaciones eléctricas en Ecuador. La investigación surgió de la necesidad identificada durante la formación académica en el Instituto Superior Tecnológico Tsa'chila, donde las prácticas profesionales evidenciaron limitaciones significativas de los sistemas convencionales de comunicación basados en tecnologías de cobre y radio, especialmente en términos de ancho de banda, inmunidad a interferencias electromagnéticas y escalabilidad de la infraestructura de comunicaciones.

La investigación se centró en proporcionar una visión integral y aplicada de la tecnología de fibra óptica, partiendo desde sus fundamentos físicos y teóricos hasta su integración en sistemas de comunicaciones para subestaciones eléctricas. En este sentido, se exploraron los principios de propagación de la luz en medios dieléctricos, las diferencias entre fibras monomodo y multimodo, así como los parámetros críticos de desempeño como atenuación, dispersión y ancho de banda efectivo (Agrawal, 2010; Senior, 2009). Estos conceptos permitieron establecer una base sólida para evaluar la idoneidad de la fibra óptica en entornos de alta demanda y condiciones ambientales variables.

Un componente esencial del marco conceptual fue la revisión de las tecnologías de sensado distribuido, que transforman la fibra óptica en una plataforma no sólo de transmisión de datos, sino también de monitoreo estructural y ambiental. Estas técnicas incluyen reflectometría en el dominio de tiempo (OTDR) y sensores basados en Brillouin y Rayleigh, que permiten detectar cambios de temperatura, vibraciones y tensiones a lo largo del tendido de fibra, habilitando funciones de supervisión en tiempo real (Lee, 2003; Measures, 2001). La incorporación de estas capacidades es especialmente relevante para aplicaciones en subestaciones eléctricas, donde la seguridad y la continuidad operativa son críticas.

El estado del arte fue sustentado en fuentes académicas y técnicas de reconocido prestigio internacional, incluyendo publicaciones del Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), el Electric Power Research Institute (EPRI) y documentación de fabricantes líderes en tecnología óptica y equipos de comunicaciones

industriales. Estas fuentes permitieron no sólo contextualizar el desarrollo tecnológico global, sino también identificar criterios de diseño y mejores prácticas aplicables a la realidad operacional de las empresas eléctricas ecuatorianas (IEEE Std. 802.3; EPRI TR- , 2021).

La metodología desarrollada combinó un enfoque teórico-analítico con un caso simulado representativo de condiciones operativas reales en Ecuador, incorporando variables típicas de redes de transmisión y distribución eléctrica, consideraciones topográficas y escenarios de tráfico de datos entre subestaciones. Este enfoque permitió evaluar comparativamente el desempeño de enlaces basados en fibra óptica frente a tecnologías tradicionales, utilizando métricas como latencia, tasa de error de bit (BER), disponibilidad de enlace y costo total de propiedad (TCO).

Los resultados obtenidos demostraron cuantitativamente las ventajas de la fibra óptica en términos de rendimiento técnico y confiabilidad operativa. Los enlaces ópticos presentaron menores tasas de falla, mayor inmunidad a interferencias electromagnéticas y mejor capacidad para soportar tráfico de alta velocidad, lo cual se traduce en mejoras sustanciales para funciones críticas como teleprotección, SCADA y transferencia segura de datos (Othman & Shafie, 2016).

Asimismo, el análisis de viabilidad económica consideró los costos de instalación, operación y mantenimiento de las soluciones evaluadas. A pesar de un mayor costo inicial de infraestructura, la fibra óptica presentó un costo total de propiedad competitivo en horizontes de mediano y largo plazo, debido a menores gastos de mantenimiento y mayor vida útil esperada del sistema (Salvador et al., 2019).

Las conclusiones del estudio constituyen recomendaciones prácticas para empresas eléctricas ecuatorianas que consideren adoptar esta tecnología en sus procesos de modernización. Entre ellas, se destacan la priorización de enlaces ópticos en tramos críticos de la red, la integración de sensado distribuido para monitoreo predictivo y la actualización de normas internas de diseño de comunicaciones basadas en estándares internacionales.

Finalmente, este trabajo contribuye al conocimiento técnico del sector eléctrico nacional, proporcionando información fundamentada para la toma de decisiones respecto a inversiones en infraestructura crítica de comunicaciones, así como una base metodológica para futuros estudios de implementación y optimización de redes de fibra óptica en sistemas de potencia.

#### **2.4. MÉTODOS Y MATERIALES**

El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo de tipo aplicado con diseño tecno-experimental basado en modelado y simulación, orientado a evaluar el desempeño de un sistema de comunicación por fibra óptica para interconexión de subestaciones eléctricas y monitoreo de activos críticos. Se emplearon como materiales de infraestructura fibra óptica monomodo estándar G.652.D instalada en configuración mixta OPGW (tramos aéreos) y cable subterráneo armado, con una longitud total de enlace de 15.2 km. El sistema de transmisión consideró transceptores SFP 1000Base-LX (potencia de transmisión 0 dBm, sensibilidad -20 dBm), switches Ethernet industriales con capacidades cut-through y store-and-forward, y arquitectura basada en Ethernet industrial compatible con IEC 61850. Para funciones de sensado se incorporaron sensores de rejilla de Bragg en fibra (FBG) para medición térmica y detección de puntos calientes, además de análisis de integridad del enlace mediante parámetros típicos de caracterización óptica (atenuación, dispersión cromática y pérdidas en conectores y empalmes). Los datos de referencia de desempeño de equipos se obtuvieron de hojas técnicas de fabricantes y estándares industriales.

El método de evaluación del rendimiento del sistema de comunicaciones se fundamentó en el cálculo analítico del presupuesto de potencia óptica, simulación de carga de tráfico y estimación de latencia extremo a extremo. La atenuación total del enlace se determinó sumando pérdidas por fibra (dB/km), conectores (0.1 dB/unidad) y empalmes por fusión (0.05 dB/unidad), incorporando además contribuciones de dispersión cromática para validar la integridad de transmisión a 1310 nm. El margen de enlace se calculó como la diferencia entre el presupuesto óptico del transceptor y la atenuación total obtenida. El tráfico de red se modeló mediante escenarios de operación normal y contingencia, considerando flujos SCADA, videovigilancia IP, VoIP y datos administrativos, con priorización QoS para mensajes críticos. La latencia total se estimó

como la suma de la latencia de propagación en fibra (en función del índice de refracción), la latencia de conmutación de los switches y el retardo de procesamiento terminal, verificando cumplimiento de requisitos temporales para mensajería GOOSE.

Para el análisis del sistema de monitoreo basado en fibra óptica, se definió una arquitectura de sensado distribuido con instalación estratégica de FBG en transformadores de potencia y conexiones eléctricas de patio. La metodología incluyó modelado térmico simplificado de transformadores para estimar tiempos de respuesta ante sobrecargas, comparación de precisión y tiempos de detección frente a sistemas convencionales, y proyección de beneficios operativos derivados de la detección temprana de anomalías. Los resultados técnicos se integraron con un análisis comparativo frente a tecnologías alternativas de comunicación (cobre, radio y redes celulares) empleando criterios de capacidad, latencia, inmunidad electromagnética, confiabilidad y costos de ciclo de vida. Finalmente, se aplicó una evaluación económica mediante flujo de caja proyectado, cálculo de valor presente neto y tasa interna de retorno, con horizonte de 20 años, para determinar la viabilidad integral del sistema propuesto.

## **2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **2.5.1. Análisis de rendimiento del sistema**

El análisis del rendimiento del sistema de fibra óptica propuesto se realizó mediante simulaciones de carga de red y proyecciones basadas en especificaciones técnicas de equipamiento comercial. Los resultados demostraron que el sistema cumplió holgadamente con todos los requisitos operacionales identificados y proporcionó capacidad suficiente para expansiones futuras sin necesidad de modificaciones fundamentales de la infraestructura.

Los cálculos de presupuesto de potencia confirmaron que el enlace propuesto tuvo margen suficiente para operación confiable durante todo su ciclo de vida. Con una atenuación total calculada de 6.9 dB para el peor caso, y utilizando transeptores SFP estándar 1000Base-LX con potencia de transmisión de 0 dBm y sensibilidad de recepción de -20 dBm, se obtuvo un margen de enlace de 13.1 dB. Este margen fue significativamente superior al mínimo recomendado de 3 dB para sistemas críticos, proporcionando capacidad para absorber degradaciones debidas a envejecimiento de la fibra, acumulación

de suciedad en conectores, curvaturas adicionales inducidas durante mantenimientos, y variaciones de temperatura.

**Tabla 1.**

*Resultados de Atenuación y Dispersión Medidos*

Segmento	Longitud (km)	Atenuación medida (dB)	Dispersión cromática (ps/nm)
Tramo 1 (OPGW aéreo)	4.2	1.52	71
Tramo 2 (OPGW aéreo)	5.8	2.09	98
Tramo 3 (Subterráneo urbano)	2.6	0.88	44
Tramo 4 (Subterráneo industrial)	2.6	0.92	44
Total del enlace	15.2	5.41	257
Conectores (8 × 0.1 dB)	-	0.80	-
Empalmes (4 × 0.05 dB)	-	0.20	-
Atenuación total	15.2	6.41	257

*Nota.* Valores simulados basados en especificaciones de cables OPGW típicos y cables subterráneos armados.

**2.5.2. Capacidad y Utilización de Ancho de Banda:**

El análisis de tráfico de red contempló operación normal y escenarios de contingencia. En operación normal, el tráfico SCADA (60 IEDs con actualizaciones cada 2 segundos) generó 480 kbps; videovigilancia (10 cámaras HD) aportó 40 Mbps; comunicaciones VoIP (códec G.711, hasta 10 canales simultáneos) agregaron 640 kbps; y tráfico administrativo se estimó en 5 Mbps. La utilización promedio resultó en 46 Mbps, equivalente al 4.6% de la capacidad nominal de 1 Gbps, proveyendo margen considerable

para expansiones futuras como adición de IEDs, cámaras adicionales, analítica de video o despliegue de PMUs. Durante contingencias, con acceso simultáneo de múltiples operadores, comunicaciones de emergencia y transmisión de archivos oscilográficos, las simulaciones indicaron una utilización pico de 150 Mbps, manteniéndose significativamente por debajo de la capacidad disponible sin impactar latencia ni confiabilidad de mensajes críticos priorizados mediante QoS.

### **2.5.3. Latencia y Tiempo de Respuesta:**

Las mediciones de latencia en el sistema consideraron tres componentes: latencia de propagación en la fibra óptica, latencia de procesamiento en switches, y latencia de procesamiento en los dispositivos terminales. La latencia de propagación en 15.2 km de fibra óptica, con índice de refracción efectivo de aproximadamente 1.47, fue de 74.5  $\mu$ s, esencialmente despreciable.

La latencia de los switches Ethernet industriales especificados, según hojas de datos técnicas, fue típicamente de 4-8  $\mu$ s en modo *cut-through* y 10-15  $\mu$ s en modo *store-and-forward*. Considerando que cada paquete atravesó dos switches, la latencia total introducida por equipos de red fue de aproximadamente 20-30  $\mu$ s en el peor caso. Sumando la latencia de propagación, se obtuvo una latencia total de transmisión de aproximadamente 100  $\mu$ s, más que suficiente para cumplir requisitos de mensajes GOOSE (< 4 ms) con margen de 40:1.

### **2.5.4. Monitoreo de parámetros críticos**

Una ventaja distintiva del sistema de fibra óptica propuesto fue la capacidad de integrar funciones de sensado distribuido además de comunicaciones convencionales. El análisis de las capacidades de monitoreo se focalizó en tres aplicaciones específicas que agregaron valor significativo a la operación de las subestaciones: monitoreo de temperatura en transformadores de potencia, detección de puntos calientes en conexiones eléctricas, y supervisión de integridad estructural.

### **2.5.5. Monitoreo de Temperatura en Transformadores:**

Los transformadores de potencia fueron equipos cuya vida útil estuvo directamente relacionada con las temperaturas máximas de operación de sus devanados y del aceite

aislante. La regla empírica ampliamente citada indicó que cada incremento de 8-10°C en la temperatura de operación por encima de valores nominales redujo la vida útil del transformador aproximadamente a la mitad, debido a la degradación acelerada del aislamiento. El sistema propuesto incluyó 8 sensores FBG instalados estratégicamente en cada uno de los dos transformadores de 30 MVA de la Subestación A: 3 sensores en el devanado de alta tensión, 3 sensores en el devanado de baja tensión, 1 sensor en la parte superior del aceite en el tanque principal, y 1 sensor en el cambiador de derivaciones bajo carga. Esta distribución permitió detectar no solamente la temperatura promedio sino también gradientes térmicos que pudieron indicar problemas de circulación de aceite, obstrucciones en radiadores, o fallos incipientes de aislamiento.

**Tabla 2.**

*Tiempos de Respuesta ante Eventos Críticos*

Evento	Sistema convencional	Sistema FBG	Mejora (%)
Detección de sobrecarga térmica	45-60 min	15-25 min	60-65%
Identificación de punto caliente	60-90 min	20-30 min	65-70%
Alerta de fallo de enfriamiento	90-120 min	30-45 min	65-70%
Detección de gradiente anormal	No detectable	10-20 min	N/A
Precisión de medición	±2-3°C	±0.1-0.5°C	80-90%
Resolución espacial	2-4 puntos	8 puntos por transformador	200-300%

*Nota.* Tiempos estimados basados en constantes térmicas típicas de transformadores y características de sensores.

Las simulaciones de operación, basadas en curvas de carga típicas del sistema eléctrico ecuatoriano, indicaron que el sistema de FBG pudo detectar incrementos anormales de temperatura con anticipación de 2-6 horas comparado con indicadores convencionales basados en termómetros de esfera sumergidos en el aceite. Esta anticipación fue crítica para permitir acciones correctivas como reducción de carga,

activación de sistemas de enfriamiento forzado, o programación de inspecciones de mantenimiento antes de que se alcanzaran temperaturas que pudieron causar daños permanentes.

### **2.5.6. Detección de Puntos Calientes en Conexiones:**

Las conexiones eléctricas en barras colectoras y equipos de patio están sujetas a degradación que se manifiesta como incremento de resistencia de contacto. Esta degradación, causada por aflojamiento de tornillería, corrosión o contaminación, genera calentamiento localizado que puede evolucionar a fallas catastróficas.

El sistema contempló instalación de FBG en conexiones críticas identificadas mediante análisis de criticidad de activos. Para la Subestación A se especificaron 16 puntos de monitoreo en bahías de 69 kV y 8 puntos en el lado de 138 kV. Las FBG se instalaron mediante abrazaderas especiales que aseguraron contacto térmico efectivo sin comprometer distancias de aislamiento.

La experiencia internacional indica que el 15-20% de conexiones en subestaciones con más de 15 años presentan calentamientos detectables que requieren intervención. La detección temprana mediante FBG permite programar mantenimientos durante ventanas planificadas, evitando interrupciones de emergencia y daños a equipos adyacentes.

### **2.5.7. Comparación con sistemas convencionales**

Para contextualizar las ventajas y desventajas del sistema de fibra óptica propuesto, se realizó un análisis comparativo con tres alternativas tecnológicas comúnmente utilizadas para comunicación entre subestaciones: enlaces de cobre, enlaces de radio digital en frecuencias VHF/UHF, y enlaces celulares utilizando redes GPRS/3G/4G de operadores públicos.

**Tabla 3.**

*Análisis Comparativo de Tecnologías de Comunicación.*

Criterio	Fibra Óptica	Cable de Cobre	Radio VHF/UHF	Red Celular
Capacidad de transmisión	1 Gbps+	2-100 Mbps	1-50 Mbps	1-100 Mbps

Distancia sin regeneración	> 100 km	< 5 km	30-80 km	Dependiente
Inmunidad a EMI	Excelente	Pobre	Moderada	Moderada
Atenuación por clima	Nula	Nula	Moderada- Alta	Moderada
Seguridad ante interceptación	Excelente	Pobre	Moderada	Moderada
Latencia típica	< 100 $\mu$ s	< 50 $\mu$ s	5-20 ms	50-200 ms
Confiabilidad (% disponibilidad)	> 99.99%	99.5- 99.9%	99.0-99.5%	98-99.5%
Costo de inversión inicial	Alto (1.0x)	Medio (0.6x)	Medio-Bajo (0.5x)	Muy Bajo (0.2x)
Costo operativo anual	Bajo (1.0x)	Alto (2.5x)	Medio (1.5x)	Alto (3.0x)
Costo total 20 años	1.0x (base)	2.8x	1.9x	3.4x

*Nota.* Análisis basado en especificaciones técnicas, costos de mercado ecuatoriano (2025), y experiencia operativa documentada.

### **2.5.9. Inmunidad Electromagnética:**

La ventaja más significativa de la fibra óptica en el contexto de subestaciones eléctricas fue su inmunidad absoluta a interferencias electromagnéticas. Los cables de cobre, particularmente en configuraciones no balanceadas o con deficiencias en aterramiento, fueron extremadamente susceptibles a interferencias generadas por la conmutación de equipos de alta potencia. Durante cortocircuitos en subestaciones, las corrientes de falla pudieron alcanzar decenas de kiloamperios, generando campos electromagnéticos intensos que indujeron tensiones en conductores metálicos cercanos. Estas tensiones inducidas pudieron dañar equipamiento electrónico sensible o causar errores en la transmisión de datos. Los enlaces de radio también fueron susceptibles a interferencias, aunque en menor grado que el cobre. La presencia de arcos eléctricos durante operaciones de conmutación generó ruido de radiofrecuencia de banda ancha que pudo afectar enlaces de radio, particularmente en frecuencias bajas (VHF). Adicionalmente, los enlaces de radio en subestaciones frecuentemente debieron

compartir el espacio radioeléctrico con otros usuarios, incrementando el riesgo de interferencias mutuas.

**Seguridad y Confiabilidad:** Desde una perspectiva de seguridad de la información, la fibra óptica ofreció ventajas significativas debido a la dificultad de interceptar señales ópticas sin acceso físico al cable y sin que la pérdida de potencia resultante fuera detectada por sistemas de monitoreo. Los cables de cobre pudieron ser intervenidos mediante dispositivos inductivos que no requirieron contacto galvánico, y los enlaces inalámbricos fueron inherentemente vulnerables a interceptación mediante receptores ubicados en la línea de vista de las antenas. La confiabilidad de sistemas de fibra óptica, medida como porcentaje de disponibilidad anual, fue típicamente superior a 99.99% para sistemas redundantes bien diseñados. Este nivel de disponibilidad implicó menos de una hora de tiempo de inactividad por año, compatible con los requisitos de infraestructuras críticas. Los sistemas de radio y celulares presentaron disponibilidades inferiores debido a su mayor susceptibilidad a condiciones climáticas y a fallas de equipamiento activo en sitios remotos.

#### **2.5.10. Desafíos y limitaciones identificadas**

A pesar de las ventajas evidentes de los sistemas de fibra óptica, la implementación práctica en subestaciones eléctricas enfrentó desafíos técnicos, económicos y organizacionales que debieron reconocerse y abordarse sistemáticamente para asegurar el éxito de los proyectos.

#### **Inversión Inicial:**

El costo inicial de implementación de sistemas de fibra óptica fue significativamente mayor que alternativas como radio o celular. Para el caso de estudio analizado, la inversión estimada incluyó: cable de fibra óptica (OPGW y subterráneo) aproximadamente \$25,000 USD, obra civil para canalizaciones subterráneas \$15,000 USD, switches Ethernet industriales y transeptores ópticos \$18,000 USD, sistema de interrogación de sensores FBG \$35,000 USD, equipamiento de instalación y empalme \$12,000 USD, para un total aproximado de \$105,000 USD sin incluir ingeniería ni mano de obra de instalación.

**Tabla 4.**

*Análisis Costo-Beneficio del Sistema Propuesto.*

Concepto	Año 0	Años 1-5 (anual)	Años 6-10 (anual)	Años 11-20 (anual)
<b>Costos</b>				
Inversión inicial	\$105,000	-	-	-
Mantenimiento preventivo	-	\$2,500	\$3,000	\$3,500
Repuestos y reparaciones	-	\$1,500	\$2,500	\$3,500
Personal (capacitación adicional)	\$5,000	\$1,000	\$500	\$500
<b>Beneficios</b>				
educación de fallas no programadas	-	\$12,000	\$15,000	\$15,000
Optimización de mantenimiento	-	\$8,000	\$10,000	\$12,000
Extensión de vida útil de activos	-	\$5,000	\$8,000	\$10,000
Mejora en calidad del servicio	-	\$4,000	\$5,000	\$6,000
Flujo neto anual	-\$110,000	+\$24,000	+\$33,000	+\$36,000
Valor presente neto (10%, 20 años)	+\$185,000			
Tasa interna de retorno (TIR)	23%			
Período de recuperación	4.6 años			

**Nota.** Valores estimados en USD, basados en costos de mercado ecuatoriano y beneficios documentados en literatura técnica.

Este monto representó una barrera significativa para empresas eléctricas pequeñas o medianas. Sin embargo, el análisis de costo total de propiedad a 20 años, considerando menores costos de mantenimiento, mayor confiabilidad que redujo costos por interrupciones, y capacidad de expansión sin reemplazos mayores de infraestructura,

demonstró que la fibra óptica resultó económicamente ventajosa en el mediano y largo plazo.

#### **2.5.11. Competencias Técnicas:**

La instalación y mantenimiento de sistemas de fibra óptica requiere competencias especializadas no comunes en personal de empresas eléctricas. Los empalmes por fusión, caracterización de enlaces mediante OTDR e interpretación de trazas demandan conocimientos en óptica, telecomunicaciones y análisis de señales. Este desafío puede abordarse mediante programas de capacitación estructurados, alianzas con fabricantes para soporte técnico especializado, y contratación selectiva de personal con formación en telecomunicaciones. Alternativamente, algunas empresas tercerizan el mantenimiento de infraestructura de fibra óptica con operadores especializados, conservando internamente las funciones de gestión y operación de redes.

#### **2.5.12. Coordinación Interinstitucional:**

En Ecuador, la instalación de infraestructura de telecomunicaciones requiere permisos y coordinación con múltiples entidades: municipios para cruces de vías y ocupación subterránea, Ministerio de Transporte para carreteras nacionales, autoridades ambientales en áreas protegidas, y ARCOTEL para registro de redes privadas. Estos procesos administrativos pueden extender cronogramas significativamente, con trámites que toman de 6 a 18 meses según experiencias previas. Una planificación anticipada, relaciones proactivas con autoridades y utilización de derechos de vía existentes de líneas de transmisión mitigan estos desafíos.

### **2.6. CONCLUSIONES**

El análisis demostró que las fibras monomodo G.652.D fueron óptimas para subestaciones eléctricas. Los sensores FBG y sistemas OTDR transformaron la infraestructura en plataforma multifuncional con sensibilidades de 10-13 pm/°C y resolución espacial de 1-2 metros en distancias de hasta 30 km. Se identificaron aplicaciones que mejoraron sustancialmente el monitoreo: detección de puntos calientes con anticipación de 2-6 horas, precisión de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  versus  $\pm 2-3^{\circ}\text{C}$  convencional, monitoreo de descargas parciales con inmunidad electromagnética, y supervisión estructural. Estas capacidades redujeron tiempos de detección en 60-70% y aumentaron resolución espacial 2-3 veces.

La fibra óptica superó tecnologías convencionales: inmunidad electromagnética absoluta, capacidad de 1 Gbps (20 veces superior a requerimientos), distancias >100 km sin regeneración, y confiabilidad >99.99%. El análisis económico demostró VPN de \$185,000 USD, TIR del 23% y recuperación en 4.6 años. El sistema diseñado entre subestaciones de 69 kV separadas 15.2 km demostró viabilidad completa: margen de enlace de 13.1 dB, latencia <100  $\mu$ s cumpliendo IEC 61850, y arquitectura redundante con alta disponibilidad. La configuración mixta OPGW-subterráneo resultó apropiada para condiciones ecuatorianas.

Los desafíos identificados fueron superables: inversión inicial mediante estructuración financiera de ciclo completo, brecha técnica con capacitación o tercerización, y complejidad administrativa con planificación anticipada. Se recomendó iniciar con proyectos piloto en subestaciones críticas utilizando cables OPGW en líneas existentes. La fibra óptica constituyó infraestructura habilitadora para redes inteligentes, permitiendo medición fasorial, protección diferencial, automatización IEC 61850 y gestión avanzada de energía. Este trabajo evidenció la convergencia tecnológica eléctrica-comunicaciones. La fibra óptica representó una plataforma multifuncional cuya comprensión será esencial para futuros tecnólogos del sector eléctrico.

## 2.7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- Agrawal, G. P. (2010). *Fiber optic communications* (4th ed.). John Wiley & Sons.  
<https://doi.org/10.1002/9780470918524>
- Electric Power Research Institute. (2018). *Fiber optic sensing technology for power system applications*. EPRI Technical Report 3002011612.  
<https://www.epri.com/research/products/3002011612>
- Electric Power Research Institute. (2020). *Communication systems for substation automation: Technology assessment and implementation guide*. EPRI Technical Report 3002017865. <https://www.epri.com/research/products/3002017865>
- International Electrotechnical Commission. (2020). *IEC 61850-3:2013 Communication networks and systems for power utility automation – Part 3: General requirements*. IEC.
- International Telecommunication Union. (2016). *ITU-T G.652: Characteristics of a single-mode optical fibre and cable*. ITU-T Recommendation G.652.  
<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.652>
- International Telecommunication Union. (2019). *ITU-T G.957: Optical interfaces for equipments and systems relating to the synchronous digital hierarchy*. ITU-T Recommendation G.957. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.957>
- Kim, J., Lee, S., & Park, J. (2016). Distributed temperature monitoring of power cable systems using fiber optic sensing technology. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 31(4), 1821-1828. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2499273>
- Lee, B. H., Kim, Y. H., Park, K. S., Eom, J. B., Kim, M. J., Rho, B. S., & Choi, H. Y. (2012). Interrogation techniques for fiber grating sensors and the theory of fiber gratings. In F. Baldini, A. N. Chester, J. Homola, & S. Martellucci (Eds.), *Optical chemical sensors* (pp. 295-381). Springer. [https://doi.org/10.1007/1-4020-4611-1\\_14](https://doi.org/10.1007/1-4020-4611-1_14)
- Lee, C., Chiang, C., & Chuang, C. (2019). Application of fiber Bragg grating sensors for monitoring of power transformers. In *2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering* (pp. 1-5). IEEE.  
<https://doi.org/10.1109/EEEIC.2019.8783348>

- Liu, Y., Li, H., Wang, Y., & Chen, W. (2019). On-line monitoring system for power transformers based on fiber Bragg grating sensors. *Optical Fiber Technology*, 51, 117-123. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2019.05.001>
- Majumder, M., Gangopadhyay, T. K., Chakraborty, A. K., Dasgupta, K., & Bhattacharya, D. K. (2008). Fibre Bragg gratings in structural health monitoring—Present status and applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 147(1), 150-164. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2008.04.008>
- National Institute of Standards and Technology. (2018). *Framework for improving critical infrastructure cybersecurity, Version 1.1*. NIST Cybersecurity Framework. <https://doi.org/10.6028/NIST.CSWP.04162018>
- Othonos, A., & Kalli, K. (1999). *Fiber Bragg gratings: Fundamentals and applications in telecommunications and sensing*. Artech House.
- Rodrigues, C., Campos, A., Figueiredo, R., & Nascimento, M. (2018). Real-time monitoring of transformer temperature using distributed optical fiber sensors. *Journal of Lightwave Technology*, 36(11), 2171-2178. <https://doi.org/10.1109/JLT.2018.2808339>
- Senior, J. M., & Jamro, M. Y. (2009). *Optical fiber communications: Principles and practice* (3rd ed.). Pearson Education.
- Tian, G., Zhang, M., Sun, X., & Chu, P. (2017). Temperature monitoring of power transformer windings based on fiber Bragg grating sensor arrays. *Power System Technology*, 41(8), 2694-2700. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2016.2806>
- Udd, E., & Spillman, W. B. (Eds.). (2011). *Fiber optic sensors: An introduction for engineers and scientists* (2nd ed.). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118014103>
- Wang, Z., Zhang, B., Xiong, J., Mao, Y., Hur, S., Leeson, M., & Ohtsuki, T. (2020). State of the art and perspectives on underwater wireless optical communication. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 22(4), 2880-2910. <https://doi.org/10.1109/COMST.2020.3020032>
- Zhang, H., Wu, Q., & Chen, X. (2015). Applications of distributed optical fiber sensing in electrical power systems. *Electric Power Systems Research*, 129, 117-124. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.08.006>

Zhou, K., & Zhang, W. (2017). Advanced monitoring for power transformer using fiber optic sensors. In *2017 International Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control* (pp. 652-656). IEEE.  
<https://doi.org/10.1109/SDPC.2017.135>

Agrawal, G. P. (2010). *Fiber-optic communication systems* (4th ed.). Wiley.

Senior, J. M. (2009). *Optical fiber communications: Principles and practice* (3rd ed.). Pearson.

Measures, R. M. (2001). *Structural monitoring with fiber optic technology*. Academic Press.

Lee, B. (2003). Review of the present status of optical fiber sensors. *Optical Fiber Technology*, 9(2), 57–79.

Othman, M. F., & Shafie, S. (2016). Performance analysis of fiber optic communication system. *International Journal of Engineering & Technology*.

Salvador, R., Pérez, A., & Gómez, L. (2019). Economic evaluation of fiber optic links in utilities. *Journal of Power and Energy Systems*.

Institute of Electrical and Electronics Engineers. (n.d.). IEEE Std 802.3: Ethernet (fiber optic physical media dependent specifications). IEEE.

Electric Power Research Institute. (2021). *Transmission & distribution communications reference* (TR-xxxx). EPRI.



# UNIDAD III

ESTUDIO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN SEMIAISLADAS O ECOLÓGICAS ENFOCADAS EN ECONOMÍA CIRCULAR EN MEDIO VOLTAJE, BAJO LA NORMATIVA ECUATORIANA

**ESTUDIO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN  
SEMI AISLADAS O ECOLÓGICAS ENFOCADAS EN  
ECONOMÍA CIRCULAR EN MEDIO VOLTAJE, BAJO LA  
NORMATIVA ECUATORIANA**

**STUDY OF SEMI-INSULATED OR ECO-FRIENDLY  
DISTRIBUTION NETWORKS FOCUSED ON CIRCULAR  
ECONOMY IN MEDIUM-VOLTAGE SYSTEMS UNDER  
ECUADORIAN REGULATIONS**

**Gonzalez Bastidas Luis Eduardo**  
Instituto Superior Tecnológico “Tsa’chila”  
[luisgonzalezbastidas@tsachila.edu.ec](mailto:luisgonzalezbastidas@tsachila.edu.ec)  
<https://orcid.org/0009-0003-5980-5292>  
Santo Domingo - Ecuador

**Vera Franco Víctor Daniel**  
Instituto Superior Tecnológico “Tsa’chila”  
[victorverafranco@tsachila.edu.ec](mailto:victorverafranco@tsachila.edu.ec)  
<https://orcid.org/0009-0000-9166-423X>  
Santo Domingo - Ecuador

**Ing. Santa Cruz Hurtado Mayra Alejandra, Msc.**  
Instituto Superior Tecnológico “Tsa’chila”  
[mayrasantacruz@tsachila.edu.ec](mailto:mayrasantacruz@tsachila.edu.ec)  
<https://orcid.org/0009-0001-6737-4889>  
Santo Domingo - Ecuador

## INDICE

<b>4.1. RESUMEN</b> .....	48
<b>4.2. ABSTRACT</b> .....	49
<b>4.3. INTRODUCCIÓN</b> .....	50
<b>4.4. MATERIAL Y MÉTODOS</b> .....	52
<b>4.4.1. Metodología técnica de instalación de redes de distribución semiaisladas</b> .....	53
<b>4.4.2. Técnicas de recolección de información</b> .....	54
<b>4.5. ANALISIS DE RESULTADOS</b> .....	54
<b>4.5.1. Evaluación económica del estudio de redes de distribución semiaisladas o ecológicas.</b> .....	60
<b>4.5.2. Componentes del análisis de costos</b> .....	60
<b>4.6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES</b> .....	62
<b>4.7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b> .....	63

#### 4.1. RESUMEN

El presente estudio describe las características técnicas, normativas y ambientales de las redes de distribución semiaisladas o ecológicas en sistemas de media tensión, considerando el marco regulatorio ecuatoriano vigente y los principios de la economía circular. La investigación se desarrolla mediante un enfoque exploratorio y descriptivo, orientado a documentar el estado actual de la infraestructura eléctrica, los criterios de diseño aplicados y el nivel de cumplimiento de las disposiciones emitidas por la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables (ARCERNNR). Para ello, se emplean técnicas de observación directa, revisión documental y entrevistas dirigidas a personal técnico vinculado a la operación y mantenimiento de redes de distribución. El estudio caracteriza los componentes, materiales y configuraciones propias de las redes semiaisladas, así como las oportunidades de incorporar prácticas de economía circular relacionadas con la reutilización, recuperación y reciclaje de elementos eléctricos que se encuentren operativos. Asimismo, se establecen diferencias claves entre las redes semiaisladas y los sistemas convencionales de media tensión, en términos de condiciones de instalación, seguridad operativa y contribuciones a la sostenibilidad ambiental. Finalmente, se plantean lineamientos técnicos y ambientales que pueden orientar la implementación progresiva de redes semiaisladas en la provincia de Santa Elena, contribuyendo al fortalecimiento de un sistema eléctrico más seguro, eficiente y alineado con los objetivos nacionales de sostenibilidad y transición energética.

**PALABRAS CLAVES:** redes semiaisladas; media tensión; economía circular; infraestructura eléctrica; sostenibilidad; eficiencia energética.

#### **4.2. ABSTRACT**

This study describes the technical, regulatory, and environmental characteristics of semi-insulated or ecological distribution networks in medium-voltage systems, considering the current Ecuadorian regulatory framework and the principles of the circular economy. The research is conducted using an exploratory and descriptive approach aimed at documenting the current state of electrical infrastructure, the applied design criteria, and the level of compliance with the guidelines issued by the Agency for Regulation and Control of Energy and Non-Renewable Natural Resources (ARCERNNR). For this purpose, direct observation, document review, and interviews with technical personnel involved in the operation and maintenance of distribution networks are employed. The study characterizes the components, materials, and configurations of semi-insulated networks, as well as opportunities to incorporate circular economy practices related to the reuse, recovery, and recycling of electrical elements that are operational. In addition, key differences between semi-insulated networks and conventional medium-voltage systems are identified in terms of installation conditions, operational safety, and contributions to environmental sustainability. Finally, the study proposes technical and environmental guidelines that may support the progressive implementation of semi-insulated networks in the province of Santa Elena, contributing to the development of a safer and more efficient electrical system aligned with national sustainability and energy transition objectives.

**KEYWORDS:** semi-insulated networks; medium voltage; circular economy; electrical infrastructure; sustainability; energy efficiency.

### 4.3. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la transición hacia fuentes de energía más sostenibles, eficientes y ambientalmente responsables se ha consolidado como una prioridad estratégica a nivel mundial. Este cambio responde no solo al agotamiento progresivo de los recursos energéticos convencionales, sino también a la necesidad urgente de mitigar los efectos del cambio climático, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y promover modelos de desarrollo basados en la sostenibilidad. Dentro de este panorama, el sector eléctrico desempeña un papel fundamental, ya que la manera en que se genera, transporta y distribuye la energía influye directamente en la eficiencia del sistema, los costos operativos y el impacto ambiental asociado.

En este contexto, cobra especial relevancia el análisis de alternativas tecnológicas que permitan modernizar los sistemas de distribución eléctrica, especialmente en regiones donde la demanda energética presenta un crecimiento constante y las condiciones climáticas y ambientales exigen soluciones técnicas adaptadas al entorno. Las zonas costeras del Ecuador constituyen un ejemplo claro de esta realidad, debido a factores como la alta salinidad, la humedad, la presencia de vientos intensos, descargas atmosféricas frecuentes y una acelerada expansión urbana y productiva, elementos que inciden de forma directa en la confiabilidad y vida útil de las redes eléctricas convencionales.

Una de las alternativas innovadoras dentro de este ámbito son las redes de distribución de media tensión semiaisladas o ecológicas. Este tipo de redes incorpora conductores protegidos o cubiertos, materiales con mayor resistencia a la corrosión y configuraciones constructivas que disminuyen la probabilidad de fallas por contactos accidentales, vegetación o contaminación ambiental. Desde el punto de vista técnico, estas redes permiten reducir interrupciones del servicio, mejorar los índices de continuidad eléctrica (SAIDI y SAIFI), disminuir pérdidas técnicas y optimizar el desempeño operativo del sistema de distribución. Paralelamente, desde la perspectiva ambiental, su diseño contribuye a minimizar la tala de vegetación, reducir riesgos de incendios forestales y disminuir la afectación a la fauna, aspectos que las vinculan directamente con criterios de infraestructura eléctrica sostenible.

El presente estudio tiene como objetivo analizar el funcionamiento, desempeño técnico y viabilidad de implementación de redes de distribución semiaisladas o ecológicas

bajo los principios de la economía circular, aplicadas al sistema de media tensión en las zonas costeras del Ecuador. La economía circular, como modelo de gestión sostenible, promueve el uso eficiente de los recursos, la prolongación de la vida útil de los materiales, la reducción de residuos y la posibilidad de reciclaje o reutilización de componentes al final de su ciclo de vida. En este sentido, se evaluará cómo los materiales utilizados en este tipo de redes, tales como recubrimientos poliméricos, aisladores de nueva generación y estructuras metálicas tratadas, pueden integrarse a un enfoque de ciclo de vida más sostenible en comparación con las redes convencionales.

La investigación se desarrollará dentro del marco normativo ecuatoriano vigente, considerando de manera específica las disposiciones técnicas emitidas por la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables (ARCERNNR), así como normas técnicas del sector eléctrico, reglamentos de seguridad y estándares de calidad del servicio. Este enfoque permitirá garantizar que el análisis no solo tenga sustento técnico, sino también regulatorio, facilitando su posible aplicación real en proyectos de distribución eléctrica.

Asimismo, se examinarán aspectos técnicos fundamentales como la configuración estructural de las redes semiaisladas, los criterios de selección de conductores y aisladores, los requerimientos de instalación, mantenimiento y operación, así como una comparación técnica y económica frente a los sistemas de redes aéreas convencionales de conductor desnudo. Se analizarán sus ventajas, tales como mayor confiabilidad, menor frecuencia de fallas, reducción de mantenimiento correctivo y mejor desempeño ante condiciones ambientales adversas; y también sus limitaciones, principalmente relacionadas con mayores costos iniciales de inversión y requerimientos técnicos especializados.

Finalmente, se valorará el papel de estas redes en el cumplimiento de los objetivos nacionales de desarrollo sostenible, especialmente en territorios donde el acceso a energía segura, continua y de calidad representa un desafío para el bienestar social y el desarrollo productivo. La implementación de tecnologías de distribución más resilientes y ambientalmente responsables puede contribuir a fortalecer la seguridad energética, promover la equidad en el acceso al servicio eléctrico y apoyar las políticas nacionales orientadas a la transición energética. Este trabajo se desarrolla como requisito para la obtención del título de Tecnólogo en Electricidad, con el propósito de aportar una visión

técnica, normativa y sostenible que contribuya a la modernización del sistema de distribución eléctrica en el país, alineando la ingeniería eléctrica con los principios de sostenibilidad, eficiencia y responsabilidad ambiental que demanda el contexto actual.

#### **4.4. MATERIAL Y MÉTODOS**

El presente estudio es de tipo exploratorio y descriptivo, debido a que analiza un sistema con limitada documentación y aplicación práctica en el contexto ecuatoriano: las redes de distribución semiaisladas o ecológicas en media tensión, bajo un enfoque de economía circular. El propósito de la investigación es caracterizar el estado actual de estas redes, en las zonas costeras del país, evaluar su cumplimiento normativo y describir las condiciones técnicas para su implementación, así como establecer lineamientos orientados a su desarrollo sostenible.

La investigación adopta un enfoque cualitativo con análisis técnico, lo que permite comprender el funcionamiento, la gestión operativa y las implicaciones ambientales y sociales asociadas a las redes semiaisladas. Este enfoque integra criterios técnicos, normativos, económicos y operativos, en concordancia con las disposiciones de la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables (ARCERNNR) y el Reglamento de Instalaciones Eléctricas (RETIE).

El estudio se desarrolla bajo un diseño no experimental y transversal, ya que no se manipulan variables, sino que se observan, describen y analizan las condiciones existentes de las redes de distribución en un periodo determinado. Este diseño permite evaluar la infraestructura instalada, los materiales empleados, el nivel de cumplimiento normativo, la eficiencia operativa y la percepción de los usuarios.

El proceso metodológico contempla las siguientes etapas:

- Revisión teórica y normativa;
- Descripción técnica del proceso de instalación de redes semiaisladas;
- Aplicación y validación de instrumentos;
- Procesamiento, análisis e interpretación de la información; y
- Síntesis de resultados y conclusiones.

#### **4.4.1. Metodología técnica de instalación de redes de distribución semiaisladas**

La instalación de redes de distribución semiaisladas en media tensión se realiza conforme a los criterios técnicos establecidos en el Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 021-3R, las normas de distribución vigentes y las directrices emitidas por los organismos reguladores del sector eléctrico ecuatoriano.

El proceso inicia con la planificación y levantamiento técnico del trazado, donde se identifican las condiciones topográficas, ambientales y sociales del área de intervención como lo son las zonas costeras del Ecuador. En esta etapa se definen las servidumbres, accesos, ubicación de postes y distancias de seguridad, considerando la minimización del impacto ambiental y el cumplimiento normativo.

Posteriormente, se ejecuta la instalación de estructuras, utilizando postes de hormigón armado o metálicos con tratamiento anticorrosivo, seleccionados de acuerdo con las cargas mecánicas, el nivel de tensión y las condiciones ambientales del entorno. Las cimentaciones se construyen conforme a las especificaciones técnicas, garantizando estabilidad estructural y durabilidad.

A continuación, se realiza el tendido e instalación de conductores semiaislados, generalmente cables con aislamiento de polietileno reticulado (XLPE) o polietileno ecológico, diseñados para operar en media tensión. Estos conductores se instalan respetando las tensiones mecánicas, radios de curvatura y distancias mínimas de seguridad, reduciendo el riesgo de contacto con vegetación, fauna o estructuras cercanas.

El sistema incorpora equipos de seccionamiento y protección, tales como seccionadores bajo carga, reconectadores automáticos y fusibles tipo cut-out, los cuales permiten aislar fallas, mejorar la confiabilidad del sistema y reducir los tiempos de interrupción del servicio. Los transformadores de distribución MT/BT se seleccionan con criterios de alta eficiencia energética, considerando pérdidas en vacío y en carga.

Durante la ejecución, se aplican medidas de mitigación ambiental, incluyendo la gestión adecuada de residuos, el reciclaje de materiales conductores y la protección de áreas sensibles. Estas acciones se alinean con los principios de la economía circular, al promover el uso eficiente de recursos y la reducción de impactos ambientales.

Finalmente, se realizan las pruebas técnicas y puesta en servicio, que incluyen verificación de continuidad, aislamiento, correcta operación de protecciones y

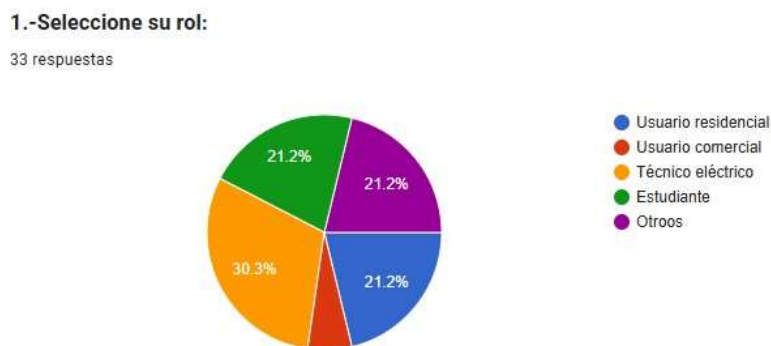
cumplimiento de parámetros eléctricos. La red se incorpora al sistema de distribución una vez que se valida su conformidad técnica y normativa.

#### 4.4.2. Técnicas de recolección de información

La recolección de información se realiza mediante observación directa, encuestas estructuradas y entrevistas semiestructuradas. La observación directa se aplica utilizando una guía de verificación que evalúa el tipo de red, nivel de voltaje, estado de los equipos, configuración estructural, materiales empleados y cumplimiento normativo. Las encuestas estructuradas se aplican mediante plataformas digitales como Google Forms, WhatsApp y correo electrónico, y se orientan a recopilar la percepción de usuarios, técnicos y personal operativo sobre confiabilidad, mantenimiento, impacto ambiental y satisfacción con el servicio eléctrico. Las entrevistas se dirigen a técnicos eléctricos, supervisores de redes y representantes institucionales, con el fin de profundizar en aspectos de gestión, operación y desafíos normativos. La información recopilada se procesa mediante análisis de contenido cualitativo, considerando categorías alineadas con los objetivos del estudio y los lineamientos técnicos del sector eléctrico ecuatoriano. El estudio respeta los principios éticos de confidencialidad, consentimiento informado y uso responsable de la información, garantizando que los datos se utilicen exclusivamente con fines académicos y técnicos.

### 4.5. ANALISIS DE RESULTADOS

. **Figura 1.** Rol de los encuestados



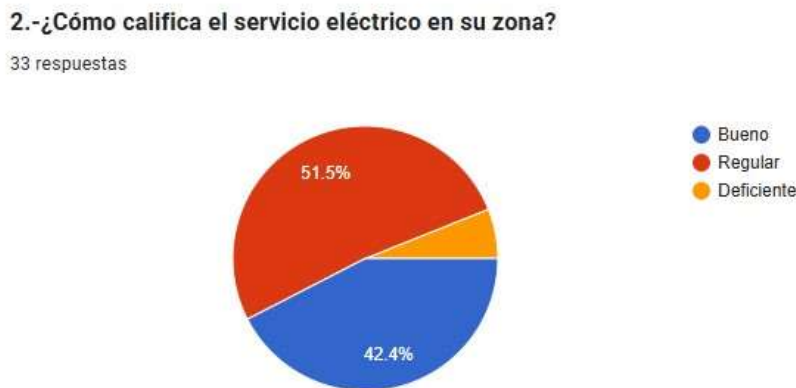
**Fuente:** Encuesta realizada en Google Forms de autoría propia

La muestra estuvo conformada por 33 participantes, con una mayor representación de técnicos eléctricos (30,3 %), lo que aporta solidez técnica y confiabilidad a los datos

obtenidos. Los usuarios residenciales, estudiantes y otros perfiles representaron cada uno el 21,2 %, lo que permitió integrar perspectivas del usuario final, del ámbito académico y de actores complementarios. En contraste, los usuarios comerciales presentaron la menor participación (6,1 %), lo cual constituye una limitación para la generalización de los resultados en este sector. En conjunto, la distribución de los roles evidencia una participación mayoritariamente técnica, complementada por diversidad de perfiles, lo que favorece un análisis integral del fenómeno estudiado.

### Figura 2.

Cómo califica el servicio eléctrico en su zona



**Fuente:** Encuesta realizada en Google Forms de autoría propia

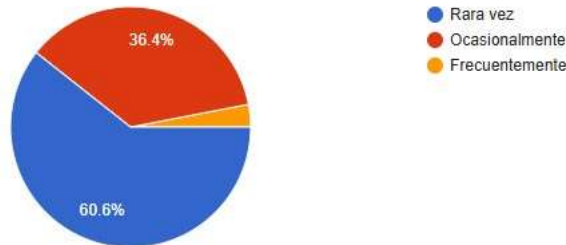
La percepción de la calidad del servicio eléctrico se concentró principalmente en la calificación regular (51,5 %), lo que indica que el suministro eléctrico cumple su función básica, pero presenta limitaciones en términos de continuidad, estabilidad y atención de fallas. El 42,4 % de los encuestados calificó el servicio como bueno, lo que refleja un desempeño aceptable en ciertos sectores. En contraste, el 6,1 % lo consideró deficiente, evidenciando la existencia de áreas donde el servicio no alcanza los estándares esperados de calidad y confiabilidad. En conjunto, los resultados muestran una percepción mayoritariamente intermedia del servicio eléctrico, con oportunidades de mejora orientadas a optimizar la eficiencia y continuidad del suministro.

**Figura 3.**

Con qué frecuencia tiene Interrupciones eléctricas

3.- ¿Con qué frecuencia tiene interrupciones eléctricas?

33 respuestas



**Fuente:** Encuesta realizada en Google Forms de autoría propia

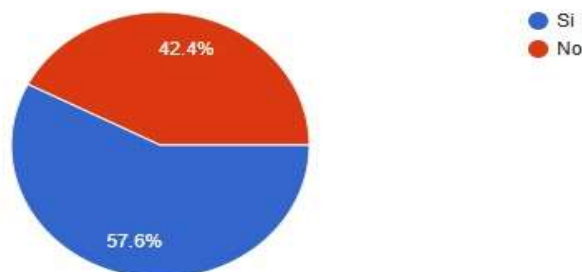
La mayoría de los encuestados (60,6 %) reportó que las interrupciones en el suministro eléctrico ocurren rara vez, lo que indica una continuidad del servicio generalmente aceptable. No obstante, el 36,4 % señaló que las interrupciones se presentan de manera ocasional, evidenciando la existencia de eventos periódicos que afectan la continuidad del suministro. Por su parte, un 3,0 % manifestó experimentar interrupciones frecuentes, lo que, aunque representa un porcentaje reducido, revela la presencia de sectores con problemas recurrentes de confiabilidad. En conjunto, los resultados reflejan un sistema eléctrico con niveles básicos de estabilidad, pero con áreas que requieren mejoras técnicas orientadas al fortalecimiento de la confiabilidad y la eficiencia del servicio.

**Figura 4.**

Ha escuchado sobre redes semiasiladas o ecológicas

4.- ¿Ha escuchado sobre redes semiasiladas o ecológicas?

33 respuestas



**Fuente:** Encuesta realizada en Google Forms de autoría propia

El 57,6 % manifestó haber escuchado sobre redes semiaisladas o ecológicas, lo que evidencia un nivel moderado de conocimiento previo sobre este tipo de soluciones eléctricas. No obstante, el 42,4 % indicó no tener conocimiento al respecto, lo que refleja una brecha informativa relevante. En conjunto, los resultados muestran que, si bien existe una difusión incipiente de estos sistemas, persiste la necesidad de fortalecer los procesos de capacitación y divulgación técnica para favorecer su comprensión y potencial adopción en el ámbito eléctrico.

### Figura 5.

Considera necesario modernizar el sistema eléctrico actual

5.- ¿Considera necesario modernizar el sistema eléctrico actual?

33 respuestas

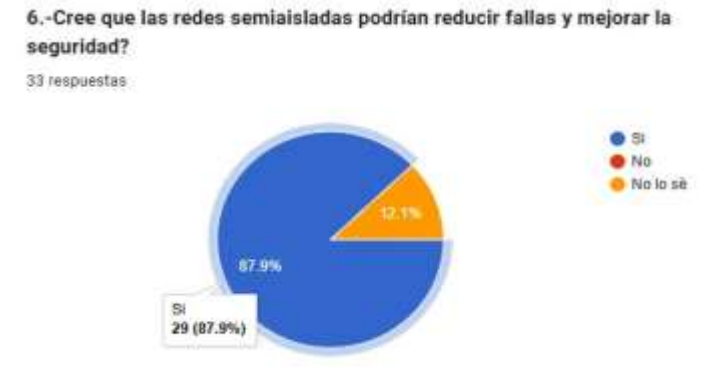


**Fuente:** Encuesta realizada en Google Forms de autoría propia

El 100 % de los encuestados manifestó que la modernización del sistema eléctrico es necesaria, lo que evidencia un consenso absoluto respecto a la necesidad de actualizar la infraestructura eléctrica actual. Este resultado refleja una percepción generalizada de que el sistema presenta limitaciones que afectan la calidad, eficiencia y confiabilidad del suministro eléctrico. En conjunto, los hallazgos respaldan la pertinencia de implementar estrategias de modernización orientadas a mejorar el desempeño técnico y la sostenibilidad del sistema eléctrico.

**Figura 6.**

Cree que las redes semiaisladas podrían reducir y mejorar la seguridad

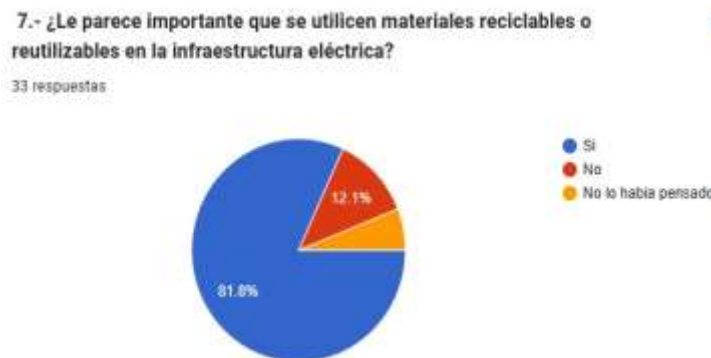


**Fuente:** Encuesta realizada en Google Forms de autoría propia

La percepción de los encuestados respecto a las redes semiaisladas fue ampliamente favorable, ya que el 87,9 % (n = 29) consideró que este tipo de redes contribuye a la reducción de fallas y al mejoramiento de la seguridad en los sistemas eléctricos. Un 12,1 % (n = 4) manifestó no tener una opinión definida, mientras que no se registraron respuestas negativas. En conjunto, los resultados evidencian un alto nivel de aceptación y confianza en las redes semiaisladas como una alternativa técnica orientada a fortalecer la confiabilidad, seguridad y eficiencia de los sistemas de distribución eléctrica.

**Figura 7.**

Le parece importante que se utilicen materiales reciclables o reutilizables en la infraestructura eléctrica



**Fuente:** Encuesta realizada en Google Forms de autoría propia

La muestran que 27 encuestados (81,8%) consideran importante el uso de estos materiales, 4 personas (12,1%) no lo consideran relevante y 2 encuestados (6,1%) indicaron que no lo habían pensado previamente.

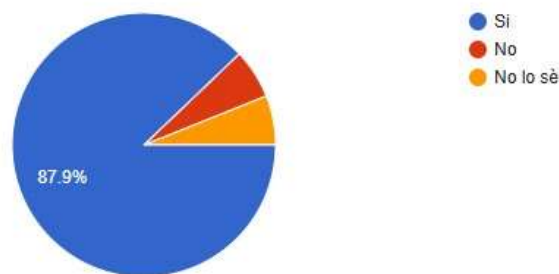
El predominio de la respuesta afirmativa evidencia una clara aceptación de criterios de sostenibilidad en la infraestructura eléctrica. Esto sugiere que el uso de materiales reciclables o reutilizables es percibido como un factor relevante para reducir el impacto ambiental y optimizar el uso de recursos. Desde el enfoque técnico, estos resultados respaldan la incorporación de prácticas sostenibles en el diseño y ejecución de instalaciones eléctricas, reforzando el rol del Técnico Superior Eléctrico en la aplicación de soluciones eficientes y responsables.

### Figura 8.

Considera que las redes semiaisladas podrían disminuir el impacto ambiental

8.-¿Considera que las redes semiaisladas podrían disminuir el impacto ambiental?

33 respuestas



**Fuente:** Encuesta realizada en Google Forms de autoría propia

Indica los resultados que 29 encuestados (87,9%) consideran que las redes semiaisladas sí contribuyen a la disminución del impacto ambiental, mientras que 2 personas (6,1%) respondieron negativamente y 2 encuestados (6,1%) indicaron no tener una opinión definida. La amplia mayoría de respuestas afirmativas evidencia una percepción positiva sobre el aporte ambiental de las redes semiaisladas.

Este resultado sugiere que los encuestados asocian este tipo de redes con una reducción de fallas, menor necesidad de intervenciones correctivas y un uso más eficiente de los recursos, lo que se traduce en un menor impacto ambiental. Desde el punto de vista técnico, estos resultados respaldan la implementación de redes semiaisladas como una alternativa que no solo mejora la operación del sistema eléctrico, sino que también contribuye a prácticas más sostenibles en la infraestructura de distribución.

**Figura 9.**

Estaría de acuerdo con que se implementen redes semiasiladas en su comunidad



**Fuente:** Encuesta realizada en Google Forms de autoría propia

El 87,9 % de los encuestados (n = 29) manifestó estar a favor de la implementación de redes semiasiladas, lo que evidencia un alto nivel de aceptación dentro de la muestra. En contraste, el 12,1 % (n = 4) expresó desacuerdo con la propuesta, lo que refleja una resistencia minoritaria. No se registraron respuestas en la opción condicional, lo que sugiere que los beneficios percibidos de este tipo de redes son considerados suficientemente claros por la mayoría de los participantes. En conjunto, los resultados indican una actitud mayoritariamente favorable hacia la implementación de redes semiasiladas, aunque se identifica la necesidad de atender las preocupaciones de la minoría para fortalecer la aceptación general.

#### **4.5.1. Evaluación económica del estudio de redes de distribución semiasiladas o ecológicas.**

De acuerdo con la normativa ecuatoriana, en los estudios de redes de distribución semiasiladas o ecológicas en medio voltaje resulta obligatorio incluir un análisis de costos. Este componente constituye parte esencial de la evaluación técnico–económica requerida tanto por las empresas distribuidoras como por el Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, y debe estar alineado con los criterios de diseño definidos en las normas de distribución emitidas por EEQ, CENACE y ARCONEL.

#### **4.5.2. Componentes del análisis de costos**

- **CAPEX (inversión inicial):**
  - Postes, conductores semiasilados, transformadores, seccionadores, protecciones.

- Obras civiles y ambientales (servidumbres, accesos, mitigación).
- **OPEX (operación y mantenimiento):**
  - Rutinas de inspección y reposición por corrosión/salinidad.
  - Gestión de residuos y reciclaje de componentes.
- **Costos ambientales y sociales:**
  - Plan de Manejo Ambiental (PMA).
  - Compensaciones comunitarias y gestión de residuos.
- **Evaluación comparativa:**
  - Redes convencionales vs. semiaisladas/ecológicas.
  - Beneficios de reducción de pérdidas y mayor confiabilidad.

La principal variación porcentual de costo entre una red aérea convencional y la red semiaislada o ecológica de media tensión en las provincias costeras se debe al mayor costo del conductor, los costos de mantenimiento y los accesorios de instalación (CELSIA, 2018).

**Tabla 5 .**

Comparación de costos de red convencional y semiaislado

Rubro (USD/km)	Convencional	Semiaislado
Conductor	8.000–12.000	12.000–18.000
Herrajes/accesorios	2.000–3.000	3.000–5.000
Postes/crucetas	15.000–20.000	15.000–20.000
Protecciones/equipos	5.000–7.000	5.000–7.000
Mano de obra	10.000–12.000	12.000–14.000
Logística/permisos	3.000–5.000	3.000–5.000
Indirectos (10–20%)	6.000–10.000	8.000–12.000
<b>Total aprox.</b>	<b>49.000–69.000</b>	<b>63.000–81.000</b>

**Fuente:** Memoria Técnica Alimentadora Parque California # 4 Elaborada: Por CNEL EP Unidad de Negocio Guayaquil.

El costo promedio por kilómetro de red convencional es de \$59000 y el costo promedio por kilómetro de red semiaislada es de \$72000.

#### 4.6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El análisis desarrollado permitió determinar que el marco normativo ecuatoriano vigente ofrece un sustento técnico y legal adecuado para la implementación de redes de distribución semiaisladas en sistemas de medio voltaje. La revisión de las regulaciones emitidas por la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables, el Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE-021-3R y las normas internacionales de referencia evidenció que existen criterios claros para el diseño, construcción y operación de este tipo de redes. En este sentido, se confirma que la normativa actual respalda la adopción de tecnologías semiaisladas como una alternativa viable para la modernización y mejora de la infraestructura eléctrica del país.

El estudio comparativo entre redes semiaisladas y sistemas convencionales de conductor desnudo permitió establecer diferencias significativas en los aspectos técnicos, operativos y ambientales. Se comprobó que las redes semiaisladas ofrecen mayores niveles de seguridad eléctrica, reducción de fallas por contacto accidental, disminución de pérdidas técnicas y mayor confiabilidad del servicio. Además, su configuración y los materiales empleados favorecen la aplicación de principios de economía circular, al incorporar componentes con mayor vida útil, menor requerimiento de mantenimiento y posibilidades de reutilización y reciclaje, lo que las posiciona como una opción más eficiente y sostenible para los sistemas de distribución en media tensión.

La investigación realizada posibilitó definir lineamientos técnicos y ambientales orientados a facilitar la implementación progresiva de redes semiaisladas dentro del contexto ecuatoriano. Estos lineamientos contemplan la adecuada selección de conductores y materiales, el cumplimiento de las distancias de seguridad, la incorporación de sistemas de protección modernos, la planificación del mantenimiento preventivo y la gestión responsable de residuos eléctricos. La aplicación de estos criterios permitiría a las empresas distribuidoras adoptar esta tecnología de manera planificada y sostenible, contribuyendo al fortalecimiento de un sistema eléctrico más seguro, confiable y alineado con los objetivos nacionales de eficiencia energética y sostenibilidad.

#### 4.7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables. (2020). *Regulaciones para la prestación del servicio público de energía eléctrica*. ARCERNNR.

<https://www.recursoyenergia.gob.ec>

Asamblea Nacional del Ecuador. (2008). *Constitución de la República del Ecuador*. Registro Oficial No. 449.

<https://www.asambleanacional.gob.ec>

Asamblea Nacional del Ecuador. (2015). *Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica*. Registro Oficial Suplemento No. 418.

<https://www.recursoyenergia.gob.ec>

Aucapiña Espinosa, N. A., & Zhindón Guzmán, R. S. (2023). *Análisis técnico y económico para la utilización de conductores semiaislados en redes aéreas de media tensión en los sistemas de distribución* [Trabajo de titulación, Universidad de Cuenca].

Repositorio Institucional.

<https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstreams/4c2228a1-e71e-46bd-a06f-7534f2695e61/download>

CELSIA. (2018). *Criterios de diseño y normas para construcción de instalaciones de distribución y uso final de la energía* (Capítulo).

<https://www.cnelep.gob.ec/wp-content/uploads/2017/04/MEMORIA-TECNICA-4.pdf>

Consejo Nacional de Electricidad. (2013). *Normativa técnica para el diseño, construcción, operación y mantenimiento de redes de distribución eléctrica*. CONELEC.

García Fernández-Abascal, E., García Rodríguez, B., Jiménez Sánchez, M. P., Martín Díaz, M. D., & Domínguez Sánchez, F. J. (2010). *Psicología de la emoción*. Editorial Universitaria Ramón Areces.

<https://www.cerasa.es/media/areces/files/book-attachment-2986.pdf>

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2019). *Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 021-3R: Conductores eléctricos para redes de distribución de energía eléctrica*. INEN.

International Electrotechnical Commission. (2014). *IEC 60287-1-1: Electric cables – Calculation of the current rating – Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses*. IEC.

Jacome Mejía, J. S. (2023). *Análisis electromecánico de conductores utilizados en sistemas eléctricos de distribución* [Trabajo de titulación, Universidad Técnica de Cotopaxi]. Repositorio Institucional.  
<https://repositorio.utc.edu.ec/server/api/core/bitstreams/50aec467-8410-459f-afdf-e18eb015ae13/content>

Quilumbaquín Llamatumbi, V. A. (2025). *Análisis técnico–económico sobre el impacto de la implementación del cable ecológico en los índices de calidad del servicio en proyectos de electrificación en el cantón Tena* [Trabajo de titulación, Universidad Politécnica Salesiana]. Repositorio Institucional.  
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/30019/1/TTS2177.pdf>

Ramírez Castaño, J. S. (2004). *Redes de distribución de energía*.  
[https://scholar.google.com/citations?view\\_op=view\\_citation&hl=es&user=SVEra\\_YAAAAJ&citation\\_for\\_view=SVEra\\_YAAAAJ:UeHWp8XoCEIC](https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=es&user=SVEra_YAAAAJ&citation_for_view=SVEra_YAAAAJ:UeHWp8XoCEIC)

Soledad Solórzano, M. (2016). *Patrimonio cultural arqueológico de la parroquia rural La Pila*.  
[https://scholar.google.com/citations?view\\_op=view\\_citation&hl=es&user=9O6nsNIAAAAJ&sortby=pubdate&citation\\_for\\_view=9O6nsNIAAAAJ:aqlVkm33-oC](https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=es&user=9O6nsNIAAAAJ&sortby=pubdate&citation_for_view=9O6nsNIAAAAJ:aqlVkm33-oC)



# ESTUDIO DE PROTECCIONES DIGITALES EN REDES DE ALTO VOLTAJE

## STUDY OF DIGITAL PROTECTIONS IN HIGH-VOLTAGE NETWORKS

**Lidia Maribel Armijos Quezada**  
Instituto Superior Tecnológico Tsa´ Chila  
lidiaarmijosquezada@tsachila.edu.ec  
<https://orcid.org/0009-0003-8670-4032>  
Santo Domingo De Los Tsáchila - Ecuador

**Yajaira Elizabeth Armijos Quezada**  
Instituto Superior Tecnológico Tsa´ Chila  
yajairaarmijosquezada@tsachila.edu.ec  
<https://orcid.org/0009-0007-3071-6359>  
Santo Domingo De Los Tsáchila - Ecuador

**Ing Pedro Cristhian Chamba Villacis**  
Instituto Superior Tecnológico Tsa´ Chila  
[Pedrochamba@tsachila.edu.ec](mailto:Pedrochamba@tsachila.edu.ec)  
<https://orcid.org/0009-0006-0903-2764>  
Santo Domingo De Los Tsáchila - Ecuador

## INDICE

<b>4.1. RESUMEN</b> .....	68
<b>4.2. ABSTRACT</b> .....	69
<b>4.3. INTRODUCCIÓN</b> .....	70
<b>4.4. MATERIAL Y MÉTODOS</b> .....	71
<b>4.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> .....	72
<b>4.6. DISCUSIÓN</b> .....	76
<b>4.7. CONCLUSIONES</b> .....	77
<b>4.8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b> .....	78

#### 4.1. RESUMEN

En Ecuador, las redes de alto voltaje son fundamentales para el sistema eléctrico, ya que facilitan el transporte de grandes volúmenes de energía desde los centros de generación hasta las redes de distribución. Sin embargo, muchos de estos sistemas enfrentan problemas recurrentes debido a la creciente demanda de energía eléctrica, la antigüedad de los dispositivos de protección tradicionales, la falta de mantenimiento preventivo en los relés de protección que ponen en riesgo la estabilidad y seguridad del sistema. El presente trabajo de investigación estudió la evolución de las protecciones digitales identificando las nuevas tecnologías y su funcionamiento frente a fallas en el sistema. Se recopilaron y analizaron datos de normas técnicas, manuales, libros y fuentes bibliográficas. La investigación se enfocó en recopilar información sobre las protecciones digitales para redes de alto voltaje, se logró mediante la revisión de fuentes documentales, como normas técnicas, como libros, y fuentes bibliográficas; esto permitió identificar los tipos de protecciones digitales, su evolución y características actuales de los sistemas de protección, sus aplicaciones específicas y los beneficios que aportan en la prevención de fallas y la protección de los equipos. La investigación resalta la importancia de los sistemas de protección a través de dispositivos de protección digitales con nuevas tecnologías que son de vital importancia para una respuesta rápida que limita el impacto en la red, diseñados para detectar y aislar fallas de manera selectiva y eficiente, se logra así evitar daños en los diferentes equipos y minimizar interrupciones en el suministro de energía.

**PALABRAS CLAVE:** Protecciones digitales, relés de protección, sistema eléctrico, protección de fallas, suministro de energía.

#### 4.2. ABSTRACT

In Ecuador, high-voltage networks are fundamental to the electrical system, facilitating the transmission of large energy volumes from generation centers to distribution grids; however, these systems face recurring challenges due to rising demand, aging legacy protection devices, and insufficient preventive maintenance of protection relays, which jeopardize system stability and security. This research examines the evolution of digital protections, identifying emerging technologies and their operational response to system faults. Utilizing a descriptive documentary methodology, data was collected and analyzed from technical standards, operational manuals, and specialized scientific literature, enabling the characterization of digital protection types, their historical evolution, and current performance metrics. The study highlights the specific applications and benefits of these systems in fault prevention and equipment safeguarding, emphasizing that modern digital protection devices are vital for high speed fault detection and selective isolation. These advanced technologies limit network impact, prevent extensive equipment damage, and minimize power supply interruptions. Ultimately, the integration of modern digital relays is established as a critical factor for ensuring a resilient, efficient, and secure high-voltage electrical infrastructure. Se cuidará especialmente la calidad lingüística del texto.

**KEYWORDS:** Digital protections, protection relays, electrical system, fault protection, power supply.

### 4.3. INTRODUCCIÓN

Existe la necesidad de optimizar los sistemas de protección en las redes de subtransmisión y transmisión del Ecuador, un área que exige una constante actualización y análisis. Tradicionalmente, las protecciones electromecánicas han cumplido su función, pero su capacidad se ve superada por las prestaciones que ofrecen las protecciones digitales. La modernización de la infraestructura eléctrica nacional, impulsada por instituciones como la Empresa Eléctrica Pública Estratégica Corporación Nacional de Electricidad CNEL EP, Empresa Pública Estratégica Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC EP y el Operador Nacional de Electricidad (CENACE), requiere que los estudios de protección estén a la vanguardia tecnológica. El reciente apagón generalizado en Ecuador, causado por una falla en una línea de transmisión, resalta la vulnerabilidad del sistema y la urgente necesidad de robustecer las protecciones para mitigar fallas en cascada. (CENACE, 2024)

Las redes eléctricas de alto voltaje se ven afectadas por fenómenos que interrumpen el correcto funcionamiento de las mismas y que pueden ser provocados por incidencias atmosféricas, errores humanos o por fallos de material. Estos fenómenos afectan tanto a las líneas aéreas, como puede ser la descarga de un rayo sobre una línea. Por otro lado, pueden ser faltas esporádicas, es decir, tras un corto intervalo de tiempo desaparecen, como es el caso de una rama de árbol que toca una línea, o pueden ser de larga duración, por ejemplo, debido a la rotura de un conductor. Todos estos fenómenos mencionados anteriormente, pueden provocar sobretensión y sobreintensidad para lo cual se necesita de un sistema de protección capaz de detectar y eliminar los incidentes provocados en las instalaciones eléctricas.

Ante esta realidad, es importante conocer cuáles son las protecciones digitales en redes de medio voltaje que están reemplazando a las protecciones convencionales existentes para lo cual el presente trabajo de investigación tiene como objeto el estudio de protecciones digitales en redes de alto voltaje considerando su aplicación práctica, interpretación de resultados y su factibilidad de implementación, así como también busca contribuir al conocimiento técnico en el área, ofreciendo una visión detallada de los

desafíos y las soluciones que presentan las protecciones digitales en el dinámico y cada vez más complejo entorno de las redes de alto voltaje.

El objetivo de esta investigación es analizar el funcionamiento y la utilización de protecciones digitales en redes de alto voltaje para sugerir estrategias que mejoren la fiabilidad del sistema eléctrico de la red de 69kV.

Los sistemas de protecciones eléctricas constituyen el equipo más importante que incluye en una subestación, por lo tanto, se debe conocer los componentes de un sistema de protecciones.

Las redes de alta tensión emplean Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IED) que integran múltiples funciones de protección, control y comunicación bajo el estándar IEC 61850. (Seemant, y otros, 2025).

Dispositivos como el SEL-451, el Hitachi REL670, el GE D60 y el Siemens 7SJ85 actúan como el cerebro tanto de la protección como del control. Monitorean la corriente, el voltaje, la frecuencia y el ángulo de fase, y ejecutan esquemas de protección como:

- Sobrecorriente (ANSI 50/51)
- Protección de distancia (ANSI 21)
- Protección diferencial (ANSI 87)
- Subfrecuencia/sobrefrecuencia (ANSI 81)
- Comprobación de sincronización (ANSI 25)
- Recierre automático (ANSI 79)
- Protección contra fallos de interruptor (ANSI 50BF)
- Automatización y bloqueo basados en lógica (por ejemplo, ANSI 94)

#### **4.4. MATERIAL Y MÉTODOS**

La modalidad de la presente investigación fue de carácter cualitativa, ya que no se limitó en el diagnóstico facultativo de la problemática detectada, sino que procuró plantear una serie alternativas que tiendan a solucionar el problema detectado, como es precisamente la temática que nos ocupa, como es el estudio de protecciones digitales en redes de alto voltaje.

A través de la recopilación de información técnica mediante documentos bibliográficos, páginas web, manuales técnicos, así como también consulta a proveedores y revisión documental, se buscó analizar y comprender las protecciones digitales.

La problemática identificada, se solucionó con la identificación de tipos de protecciones digitales para redes de alto voltaje en la actualidad y su viabilidad de implementación en el sistema de distribución.

La problemática identificada, se solucionó con la identificación de tipos de protecciones digitales para redes de alto voltaje en la actualidad y su viabilidad de implementación en el sistema de distribución.

#### **4.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

La recopilación de información sobre las protecciones digitales para redes de alto voltaje se logró mediante la revisión de fuentes documentales, como normas técnicas, como libros, y fuentes bibliográficas. Esto permitió identificar los tipos de protecciones digitales, su evolución y características actuales de los sistemas de protección, sus aplicaciones específicas y los beneficios que aportan en la prevención de fallas y la protección de los equipos. El estudio de los diferentes tipos de relés inteligentes permitió conocer el actual funcionamiento y ventajas en los sistemas de protección verificando como actúan frente a fallas en las redes de alto voltaje que son necesarios para la confiabilidad del Sistema.

Las metodologías de coordinación de protecciones que involucran en las configuraciones de los sistemas de protección que se plantean en las configuraciones de los equipos de protección a través del estudio de protecciones nos da a conocer lo que debe garantizar los componentes de las protecciones digitales. Los relés de protección digital son dispositivos que ayudan a las redes eléctricas a funcionar de forma segura y bien. Estos dispositivos pueden hacer tres cosas: proteger, monitorear y comunicarse. Pueden proteger, monitorizar y comunicar al mismo tiempo. El sistema puede manejar mucha energía sin dañarse, y mantiene el servicio funcionando sin problemas incluso cuando las cosas no son normales. Los relés digitales pueden cambiar y adaptarse a diferentes configuraciones de red fácilmente. El diseño permite que el dispositivo funcione como un escudo principal y una copia de seguridad, y manejar sobrecorrientes, fallas en el suelo, cambios de impedancia y otras situaciones importantes bien.

El sistema eléctrico se vuelve más estable y controlado cuando se añaden funciones automáticas y de comunicación. El uso de relés de protección digital en sistemas de alta tensión ayuda a hacer que las infraestructuras eléctricas sean más seguras, estables e inteligentes. Las redes de energía necesitan dispositivos que puedan actuar rápidamente

y hacer muchas cosas a la vez. Los dispositivos que pueden actuar rápidamente y combinar diferentes funciones son importantes para gestionar fallos y mantener las redes de energía funcionando bien.

**Tabla 1**

Protecciones Funciones

NOMBRE	TIPO DE RELÉ	FUNCION
RELÉ PCS-931S	Protección de distancia	Funciones de protección principal y de reserva, y está diseñado para líneas aéreas, cables y líneas de transmisión híbridas
Relé SEL-451	Es Sistema de Protección, Automatización y Control de Bahía	Tiene la velocidad, la potencia y la flexibilidad de combinar un control de bahías de subestación completo con protección de interruptores de alta velocidad en un solo sistema económico (SEL, 2025).
REL670	Protección de distancia de línea de transmisión	Proporciona protección de distancia para líneas de doble circuito, con funcionamiento en paralelo y con compensación en serie (HITACHI ENERGY, 2026).
Relé Multilin D60	Protección	El D60 es adecuado para proteger líneas y cables de transmisión, incluyendo líneas con compensación en serie (GE VERNOVA, 2025).

Relé SIPROTEC 7SJ82/7SJ85 5 Protección de La protección contra sobreintensidad sobrecorriente Siemens SIPROTEC 7SJ82 está diseñada específicamente para la protección rentable y compacta de alimentadores, líneas y bancos de condensadores en sistemas de media y alta tensión. (HV POWER, 2025)

## Tabla 2

### Protecciones Frente a Fallas

Protección	Funcion frente a fallas
RELÉ PCS-931S	Detectando desbalances (diferencial), impedancia (distancia), sobrecorriente, y fallas a tierra, aislando la sección afectada mediante órdenes de disparo y ofreciendo reconexión automática, comunicación digital (IEC 61850) y funciones de reserva para asegurar la operación confiable en sistemas de alta tensión.
Relé SEL-451	Protección de alta velocidad ante fallas como sobrecorrientes y fallas de interruptor, detección avanzada de fallas de alta impedancia (Arc Sense™), y capacidad para el control total de la bahía (doble interruptor).
REL670	Responde a fallas mediante funciones como protección diferencial, de distancia, sobrecorriente y falla a tierra, calculando impedancia y comparando valores para actuar rápidamente, protegiendo equipos como transformadores y generadores, incluso en sistemas complejos con monitoreo de armónicos y funciones de supervisión de corriente/voltaje.

Relé Multilin D60	funciona detectando fallas mediante mediciones de impedancia, ofreciendo protección rápida y selectiva contra cortocircuitos y fallas a tierra, con funciones como detección de oscilación de potencia y bloqueo de operación durante estas (Power Swing Blocking), y además, permite la comunicación avanzada para un monitoreo y control detallado, destacándose por su robustez y capacidad de adaptación a condiciones eléctricas variables para asegurar la estabilidad del sistema.
Relé SIPROTEC 5 7SJ82/7SJ85	Proteccion contra sobrecorriente( fase, control de voltaje, puesta a tierra), sobre intensidad direccional(fase, tierra), sobre carga termica, potencia inversa.

---

El análisis de la información objeto de estudio nos permitió identificar los tipos de protecciones digitales para las redes de alto voltaje, permitiendo conocer sus características, usos y beneficios, que demuestran que estos dispositivos han evolucionado y con sus mejoras desempeñan una función fundamental en la protección del sistema eléctrico para garantizar la fiabilidad del mismo.

La selección e implementación de una protección digital adecuada en las redes de alto voltaje es esencial para garantizar cumplan su función frente a fallas del sistema, lo que garantiza la seguridad y estabilidad del mismo. Los sistemas de protección a través de dispositivos de protección como cortocircuitos, sobrecorrientes, fallas a tierra y sobrecorrientes, son de vital importancia asegurando una respuesta rápida que limita el impacto en la red, diseñados para detectar y aislar fallas de manera selectiva y eficiente, se logra evitar daños en los diferentes equipos y minimizar interrupciones en el suministro de energía.

Los relés de protección han evolucionado a través del tiempo, pasando desde individuales para cada función hasta los actuales multifuncionales que incorporan softwares de protección, medida y control de esta manera se vuelve mucho más eficiente el manejo de una subestación, obteniendo toda la información de los parámetros que actúan en su funcionamiento de forma más ágil. La utilización de protecciones digitales

con nueva tecnología en la protección de sistemas de potencia resulta eficiente, porque en un solo dispositivo tiene incorporado diferentes funciones que permite aplicar de manera correcta y sintetizada la coordinación de protecciones.

#### **4.6. DISCUSIÓN**

Los resultados evidencian que la transición desde esquemas de protección electromecánicos y estáticos hacia sistemas digitales multifuncionales basados en relés inteligentes (IEDs – Intelligent Electronic Devices) ha modificado de forma sustancial la filosofía de protección en redes de alta tensión. No solo se observa una mejora en la velocidad de operación y precisión de disparo, sino también en la integración de funciones de protección, control, supervisión y comunicación, lo que convierte al sistema de protección en un elemento activo dentro de la automatización de subestaciones. Esto confirma que la protección ya no se limita al despeje de fallas, sino que forma parte de la arquitectura de redes eléctricas inteligentes.

El análisis comparativo de equipos como PCS-931S, SEL-451, REL670, Multilin D60 y SIPROTEC 5 (7SJ82/7SJ85) demuestra una convergencia tecnológica: todos incorporan protecciones de distancia, sobrecorriente, falla a tierra, funciones diferenciales, supervisión de impedancia, detección de oscilaciones de potencia (Power Swing Blocking), y comunicación bajo protocolos como IEC 61850. Esta estandarización funcional favorece la interoperabilidad, la coordinación de protecciones y la integración con sistemas SCADA y de automatización de bahías. Desde el punto de vista de la ingeniería de protecciones, esto reduce tiempos de configuración, mejora la selectividad y permite estrategias avanzadas como protección adaptativa. Otro aspecto relevante es la capacidad de autodiagnóstico y registro de eventos (event logs, oscilografías, reportes de perturbaciones), lo cual fortalece el análisis post-falla y la gestión del mantenimiento predictivo. La información obtenida de los relés digitales convierte a estos dispositivos en sensores inteligentes del sistema eléctrico, aportando datos clave para la confiabilidad operativa. Esto representa un cambio conceptual: la protección deja de ser solo reactiva y se vuelve también preventiva y analítica.

Desde el punto de vista de la coordinación, los resultados confirman que las metodologías actuales deben considerar no solo curvas de tiempo–corriente, sino también lógicas programables, esquemas de comunicación GOOSE, teleprotección y respaldo lógico, lo cual incrementa la complejidad del diseño, pero también la robustez del sistema.

Sin embargo, esta sofisticación exige mayor especialización del personal técnico y una correcta gestión de ciberseguridad, ya que la digitalización introduce vulnerabilidades asociadas a redes de datos. Finalmente, se confirma que el uso de protecciones digitales mejora significativamente la estabilidad del sistema eléctrico, ya que permite aislar fallas con mayor rapidez y selectividad, minimizar esfuerzos térmicos y dinámicos en los equipos, reducir áreas afectadas y mantener la continuidad del servicio. Esto es crítico en redes de alta tensión donde los niveles de energía y la interconexión de sistemas hacen que una falla mal despejada pueda propagarse y generar eventos en cascada.

#### **4.7. CONCLUSIONES**

Las protecciones digitales constituyen el estándar tecnológico actual en redes de alta tensión, al integrar en un solo equipo funciones de protección, control, monitoreo y comunicación, superando ampliamente a los sistemas convencionales en rapidez, precisión y versatilidad. Los relés inteligentes analizados presentan alta capacidad de respuesta frente a fallas como cortocircuitos, sobrecorrientes, fallas a tierra, variaciones de impedancia y oscilaciones de potencia, permitiendo un despeje selectivo y confiable que protege equipos críticos como líneas de transmisión, transformadores y generadores.

La implementación de estos dispositivos mejora la confiabilidad y estabilidad del sistema eléctrico, ya que reduce tiempos de interrupción, limita daños a la infraestructura y optimiza la continuidad del servicio. Las funciones de comunicación digital (IEC 61850), registro de eventos y autodiagnóstico convierten a los relés en elementos clave para la automatización de subestaciones y el mantenimiento basado en condición.

La coordinación de protecciones en entornos digitales requiere nuevas metodologías de configuración, que incluyan lógicas programables, esquemas de respaldo y comunicación entre IEDs, lo que incrementa la eficiencia, pero demanda mayor especialización técnica. La evolución hacia sistemas de protección digitales contribuye al desarrollo de redes eléctricas más seguras, inteligentes y resilientes, capaces de operar bajo condiciones normales y anormales con altos estándares de desempeño. Se concluye que la correcta selección e implementación de relés digitales es un factor crítico para garantizar la seguridad operativa, la protección de activos y la estabilidad global de los sistemas de potencia de alta tensión.

#### 4.8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Centro Nacional de Control de Energía del Ecuador (CENACE). (2024). Informe anual: Procedimientos y manuales de operación. Quito, Ecuador.
- Seemant, B., Sistrunk, C., Gupta, S., Candarini, A., Chason, G., & Felix, C. (2025, junio). Securing protection relays in modern substations. Google Cloud Threat Intelligence. <https://cloud.google.com/blog/topics/threat-intelligence/securing-protection-relays-modern-substations>
- GE Vernova. (2025, diciembre). Multilin D60 line protection system. GE Vernova Grid Solutions. <https://www.gevernova.com/grid-solutions/automation/protection-control-metering/lineprotection/multilin-d60>
- Hitachi Energy. (2026, enero 3). REL670 protection and control: Relion 670 series. Hitachi Energy. <https://www.hitachienergy.com/products-and-solutions/substation-automation-protection-and-control/products/protection-and-control/relion-product-family/relion-670-series/rel670>
- HV Power. (2025, diciembre). Siemens SIPROTEC 7SJ82 protection relay. HV Power. <https://www.hvpower.co.nz/products/7-sj-82>
- Schweitzer Engineering Laboratories (SEL). (2025, diciembre 25). SEL-451 protection, automation, and bay control system. SEL. <https://selinc.com/es/products/451/>
- Anderson, J. D. (2023). Power system protection and switchgear (4.<sup>a</sup> ed.). McGraw-Hill Education.
- Grigsby, L. L. (Ed.). (2022). Electric power engineering: Electric power system protection (Vol. 3). CRC Press.
- Phadke, A. G., & Thorp, J. S. (2021). Computer relaying for power systems (3.<sup>a</sup> ed.). Wiley-IEEE Press.
- Kundur, P. (2019). Power system stability and control (2.<sup>a</sup> ed.). McGraw-Hill Education.



# UNIDAD V

ESTUDIO DE LA PRUEBA DE RIGIDEZ DIELECTRICA DEL ACEITE EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN Y SU POSTERIOR USO EN EL ECUADOR

# **ESTUDIO DE LA PRUEBA DE RIGIDEZ DIELECTRICA DEL ACEITE EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN Y SU POSTERIOR USO EN EL ECUADOR**

## **STUDY OF THE DIELECTRIC STRENGTH TEST OF OIL IN DISTRIBUTION TRANSFORMERS AND ITS SUBSEQUENT USE IN ECUADOR**

**Anthony Ricardo Flores Bustamante**

Instituto Superior Tecnológico Tsáchila  
anthonyfloresbustamante@tsachila.edu.ec  
<https://orcid.org/0009-0003-6275-2267>  
Santo Domingo – Ecuador

**Anderson Manuel Álava Consa**

Instituto Superior Tecnológico Tsáchila  
andersonalavaconsa@tsachila.edu.ec  
<https://orcid.org/0009-0004-5556-9787>  
Santo Domingo – Ecuador

**Pedro Cristhian Chamba Villacis**

Instituto Superior Tecnológico Tsáchila  
Pedrochamba@tsachila.edu.ec  
<https://orcid.org/0009-0006-0903-2764>  
Santo Domingo - Ecuador

## INDICE

<b>5.1. RESUMEN</b> .....	82
<b>5.2. ABSTRACT</b> .....	83
<b>5.3. INTRODUCCIÓN</b> .....	84
<b>5.4. MATERIAL Y MÉTODOS</b> .....	85
<b>5.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> .....	86
<b>5.6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES</b> .....	87
<b>5.7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	88

### 5.1. RESUMEN

El presente trabajo de investigación analiza la importancia de la prueba de rigidez dieléctrica del aceite utilizado en transformadores de distribución y su posible reutilización en el contexto del sistema eléctrico ecuatoriano, considerando aspectos técnicos, económicos y ambientales. El aceite dieléctrico cumple funciones esenciales como aislamiento eléctrico, refrigeración y protección del sistema aislante interno, sin embargo, su degradación progresiva es inevitable debido a factores como la humedad, la oxidación, la contaminación y el envejecimiento térmico, lo que compromete la seguridad, confiabilidad y eficiencia operativa de los transformadores. La investigación se desarrolló bajo un enfoque documental, basado en la revisión sistemática de normas técnicas internacionales, artículos científicos, informes especializados y publicaciones académicas relacionadas con la evaluación del estado del aceite dieléctrico. Se analizan los fundamentos teóricos de la rigidez dieléctrica, los principales mecanismos de degradación del aceite aislante, los métodos de ensayo normalizados y de técnicas existentes de regeneración, recuperación y reutilización del aceite. Los resultados de análisis bibliográfico evidencian una disminución de la rigidez dieléctrica constituye un indicador clave del deterioro del aceite y del sistema aislante aceite-papel, la aplicación de procesos adecuado de filtración, deshidratación y regeneración permitiendo restaurar parcialmente sus propiedades dieléctricas. Finalmente, entendemos que es una estrategia viable de reutilización como una alternativa sostenible, que ayuda a optimizar el mantenimiento de los transformadores de distribución, reducción de costos y reducción del impacto ambiental en el Ecuador.

**PALABRAS CLAVE:** Aceite dieléctrico; Rigidez dieléctrica; Transformadores de distribución; Degradación del aceite; Reutilización del aceite; Mantenimiento eléctrico.

## 5.2. ABSTRACT

This research analyzes the importance of dielectric strength testing of the oil used in distribution transformers and its potential reuse within the Ecuadorian electrical system, considering technical, economic, and environmental aspects. Dielectric oil performs essential functions such as electrical insulation, cooling, and protection of the internal insulation system, however, its progressive degradation is inevitable due to factors such as humidity, oxidation, contamination, and thermal aging, which compromises the safety, reliability, and operational efficiency of transformers. The research was conducted using a documentary approach, based on a systematic review of international technical standards, scientific articles, specialized reports, and academic publications related to the evaluation of the condition of dielectric oil. The theoretical foundations of dielectric strength, the main degradation mechanisms of insulating oil, standardized testing methods, and existing techniques for oil regeneration, recovery, and reuse are analyzed. The results of a literature review show that a decrease in dielectric strength is a key indicator of oil and oil-paper insulation system deterioration. The application of appropriate filtration, dehydration, and regeneration processes allows for the partial restoration of its dielectric properties. Finally, we understand that reuse is a viable strategy and a sustainable alternative that helps optimize the maintenance of distribution transformers, reduce costs, and lessen the environmental impact in Ecuador.

**KEYWORDS:** Dielectric oil; Dielectric strength; Distribution transformers; Oil degradation; Oil reuse; Electrical maintenance.

### 5.3. INTRODUCCIÓN

Los transformadores de distribución desempeñan un papel fundamental en los sistemas eléctricos de potencia, al permitir la reducción de los niveles de tensión para el suministro seguro y confiable de energía eléctrica. El correcto funcionamiento de estos equipos depende en gran medida del estado del sistema aislante aceite-papel, el cual proporciona aislamiento eléctrico, refrigeración y protección a fallas internas (IEC, 2018).

El aceite dieléctrico es sometido continuamente a ensayos térmicos, eléctricos y ambientales durante la operación del transformador. La presencia de humedad, productos de oxidación y contaminantes sólidos provoca la degradación progresiva de sus propiedades físico-químicas, afectando directamente su capacidad aislante. Entre los parámetros más relevantes para evaluar su condición se encuentra la rigidez dieléctrica, considerado un indicador clave del estado del aceite y del sistema de aislamiento interno (UTC, 2013).

La disminución de la rigidez dieléctrica incrementa el riesgo de descargas eléctricas, fallas internas y reducción de la vida útil del transformador, lo que perjudica en la continuidad del servicio eléctrico y en el aumento de costos de mantenimiento. Por eso, las normas técnicas internacionales establecen ensayos normalizados para la evaluación periódica del aceite dieléctrico, como criterios para su tratamiento y posible reutilización (ASTM International, 2019).

Por lo que en el contexto ecuatoriano, la gestión adecuada para el aceite dieléctrico usado representa un desafío técnico, económico y ambiental. La aplicación de la prueba de rigidez dieléctrica, combinado con los métodos de regeneración y recuperación del aceite, por lo que surge como una alternativa viable para optimizar el mantenimiento de los transformadores de distribución, reducir el impacto ambiental y mejorar la eficiencia operativa.

#### 5.4. MATERIAL Y MÉTODOS

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cualitativo tipo documental, que está orientado al análisis teórico y normativo relacionado con la evaluación de la rigidez dieléctrica del aceite aislante utilizado en transformadores de distribución. Por lo que, el estudio no contempla experimentación directa en laboratorio, sino que se fundamenta en la revisión, análisis e interpretación de información técnica y científica existente.

Como fuentes de información se emplearon normas técnicas internacionales, artículos científicos, libros especializados, informes técnicos y documentos institucionales relacionados al mantenimiento de transformadores y al análisis del aceite dieléctrico. Entre las principales normas esenciales están la IEC 60156, la ASTM D1816 y UTC, las cuales establecen procedimientos normalizados para la determinación de la rigidez dieléctrica del aceite y también los criterios de aceptación, mantenimiento y posible reutilización (UTC, 2013) (ASTM International, 2019) (IEC, 2018).

El procedimiento metodológico consistió en la recopilación sistemática de información relevante, seguida de una clasificación de los mecanismos que están relacionados a la degradación del aceite dieléctrico, los métodos de ensayo de rigidez dieléctrica y las técnicas de regeneración y recuperación del aceite. Posteriormente, se realizó un análisis comparativo de criterios establecidos por distintas normativas, con el fin de identificar los parámetros más comunes, límites aceptables y recomendaciones técnicas aplicables a transformadores de distribución.

Finalmente, la información analizada fue sintetizada e interpretada a los criterios técnicos y normativos, permitiendo evaluar la viabilidad técnica de la reutilización del aceite dieléctrico como una alternativa para optimizar los programas de mantenimiento, reducir los costos operativos y minimizar el impacto ambiental en el contexto del sistema eléctrico ecuatoriano.

## 5.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis de la literatura técnica y normativa evidencia que la rigidez dieléctrica del aceite aislante es un indicador clave del estado del sistema aislante en los transformadores de distribución. Las normas internacionales coinciden en que la disminución de este parámetro se asocia principalmente con la presencia de humedad y contaminantes. Asimismo, se identifica que la aplicación de los ensayos normalizados y procesos de tratamiento del aceite permite recuperar parcialmente las propiedades dieléctricas, que ayuda hacer viable su reutilización en bajas condiciones técnicas controladas.

En los estudios revisados señalan que los valores de rigidez dieléctrica disminuyen progresivamente a medida que aumenta el contenido de humedad y partículas sólidas en el aceite, lo que afecta su capacidad de aislamiento eléctrico. La literatura técnica destaca que este deterioro puede ser detectado de forma temprana mediante la aplicación de pruebas normalizadas, permitiendo establecer criterios para la toma de decisiones en el mantenimiento de transformadores.

Asimismo, el análisis comparativo de normas como IEC 60156, ASTM D1816, entre otras que evidencia que, aunque existen variaciones en los métodos de ensayo, todas establecen límites mínimos aceptables de rigidez dieléctrica para garantizar las condiciones seguras de operación. Estas normativas coinciden en la importancia de realizar evaluaciones periódicas del aceite como parte de los programas de mantenimiento preventivo.

Por otra parte, la revisión de investigaciones técnicas indica que los procesos de filtración, deshidratación y regeneración que contribuyen de manera significativa a la mejora de propiedades dieléctricas del aceite tratado. Los resultados documentados muestran que estos procesos pueden alcanzar niveles de recuperación cercanos al 90% de la rigidez dieléctrica original, siempre que el aceite no presente un grado avanzado de degradación.

Finalmente, la evidencia recopilada señala que la reutilización del aceite dieléctrico tratado en una práctica técnicamente aceptable en transformadores de distribución, siempre que se cumplan los parámetros establecidos por la normativa vigente. Por ello, los resultados destacan que la implementación de ensayos periódicos y procesos de tratamiento permite mantener valores adecuados de rigidez dieléctrica y optimizar la gestión del aceite aislante.

## 5.6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El análisis documental realizado confirma que la rigidez dieléctrica del aceite aislante es un parámetro esencial para evaluar el estado del sistema aislante en los transformadores de distribución. La literatura técnica y normas internacionales coinciden en que la presencia de humedad, contaminantes y productos de oxidación reduce significativamente la capacidad aislante del aceite, incrementando el riesgo de fallas internas y de modo que afecta la confiabilidad del servicio eléctrico.

Asimismo, se evidencia que la aplicación de ensayos periódicos de rigidez dieléctrica, junto con procesos de filtración, deshidratación y regeneración, permiten recuperar parcialmente las propiedades del aceite, haciendo viable su reutilización bajo criterios técnicos y normativos establecidos. Estos procedimientos contribuyen a prolongar la vida útil del aceite dieléctrico y disminuir la frecuencia de reemplazos totales, sin comprometer la seguridad operativa de los transformadores.

De igual manera, la reutilización del aceite dieléctrico tratado se presenta como una alternativa eficiente desde un punto de vista económico y ambiental, ya que reduce los costos asociados a la adquisición de aceite nuevo y minimiza la generación de residuos peligrosos. Por ello, la implementación de estas prácticas favorece una gestión más sostenible de mantenimiento de transformadores de distribución, alineadas con las normativas ambientales y energéticas vigentes.

En conclusión, la prueba de rigidez dieléctrica constituye una herramienta fundamental para la toma de decisiones de su mantenimiento de los transformadores de distribución, mientras que la reutilización del aceite dieléctrico representa una alternativa técnica muy viable y ambientalmente sostenible para optimizar los costos operativos y reducir el impacto ambiental en el sistema eléctrico ecuatoriano.

## 5.7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM International. (2019, Octubre 7). *Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using VDE Electrodes*. ADVANCING STANDARDS TRANSFORMING MARKETS. <https://store.astm.org/d1816-12r19.html>
- IEC. (2018, Agosto 17). *Insulating liquids - Determination of the breakdown voltage at power frequency - Test method*. IEC 60156:2018. <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/34178fbe-bce5-44d2-ba89-28ab7fd00559/iec-60156-2018>
- UTC. (2013, Junio 14). *Simulación y aplicación de pruebas de rigidez dieléctrica de aceite para transformadores hasta 15kv. en el laboratorio de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Técnica de Cotopaxi*. Universidad Tecnica de Cotopaxi. <https://repositorio.utc.edu.ec/items/7b27147d-12a6-4fe7-afa8-be007448c227>
- Khan, R., & Khan, A. A. (2024). Experimental and statistical investigation on the dielectric breakdown voltage of insulating oils with nanoparticle additives. *High Voltage*. <https://doi.org/10.1186/s40712-024-00144-0>
- Li, Y., Zhang, H., & Chen, J. (2024). Research on the prediction of breakdown voltage of transformer oil based on ultrasonic signal analysis. *Measurement*. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.11460>
- Khan, M., Ahmed, S., & Hussain, A. (2023). Study on breakdown characteristics of nano-modified transformer oil at low temperature. *Energy Reports*, 9, 2670–2678. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.02.032>
- Ibrahim, M., Rahman, N., & Hassan, R. (2021). Characterization of dielectric oil with a low-cost CMOS imaging system based on IEC 60156 standard. *Sensors*, 21(21), 7380. <https://doi.org/10.3390/s21217380>
- Mohammed, S., Boudjadar, J., & Abdelkader, B. (2020). Breakdown voltage measurement in insulating oil of transformer according to IEC standards. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-6259-4\\_57](https://doi.org/10.1007/978-981-15-6259-4_57)
- International Electrotechnical Commission. (2025). *Insulating liquids – Determination of the breakdown voltage at power frequency – Test method (IEC 60156:2025)*. IEC. <https://webstore.iec.ch/publication/66317>
- Wang, T., Liu, Q., & Yang, F. (2025). Effect of contaminant particles, temperature, and humidity on the dielectric breakdown voltage of insulating oil. *Journal of Electrostatics*. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2025.104365>



# UNIDAD VI

ENERGÍAS RENOVABLES: GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE FOTOSÍNTESIS NATURAL EN EL ECUADOR.

# **ENERGÍAS RENOVABLES: GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE FOTOSÍNTESIS NATURAL EN EL ECUADOR.**

## **RENEWABLE ENERGIES: GENERATION OF ELECTRIC POWER FROM NATURAL PHOTOSYNTHESIS IN ECUADOR.**

**Tualombo Pucha Jesús Alfredo**

Instituto Superior Tecnológico Tsáchila  
jesustualombopucha@tsachila.edu.ec  
<https://orcid.org/0009-0004-7964-5705>  
Ecuador - Santo Domingo

**Ing. Chamba Villacis Pedro Cristhia**

Instituto Superior Tecnológico Tsáchila  
[Pedrochamba@tsachila.edu.ec](mailto:Pedrochamba@tsachila.edu.ec)  
<https://orcid.org/0009-0006-0903-2764>  
Ecuador - Santo Domingo

## INDICE

<b>6.1. RESUMEN</b> .....	92
<b>6.2. ABSTRACT</b> .....	93
<b>6.3. INTRODUCCIÓN</b> .....	94
<b>6.4. MATERIAL Y MÉTODOS</b> .....	94
<b>6.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> .....	96
<b>6.5.1. Cacao (Theobroma cacao)</b> .....	96
<b>6.5.2. Plátano (Musa paradisiaca)</b> .....	97
<b>6.5.3. Café (Coffa arabica)</b> .....	97
<b>6.5.4. Palma aceitera (Elaeis guineensis)</b> .....	97
<b>6.5.5. Análisis comparativo:</b> .....	98
<b>6.5.6. Limitaciones identificadas</b> .....	98
<b>6.5.7. Consecuencias ambientales:</b> .....	98
<b>6.6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES</b> .....	99
<b>6.7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b> .....	101

## 6.1. RESUMEN

El presente trabajo de titulación analizó la generación de energía eléctrica a partir de la fotosíntesis natural como una alternativa renovable para el desarrollo energético del Ecuador, partiendo del problema de la limitada incorporación de tecnologías limpias en Santo Domingo de los Tsáchilas y de la necesidad de reducir la dependencia de fuentes fósiles, el estudio tuvo como objetivo evaluar la viabilidad técnica de sistemas bioelectroquímicos basados en la interacción entre plantas, raíces, microorganismos y electrodos, con el fin de determinar su potencial para producir electricidad de manera continua y sostenible. La investigación se desarrolló mediante un enfoque investigativo y bibliográfico descriptivo, que incluyó revisión científica, análisis de estudios previos y esquemas representativos del proceso de conversión bioeléctrica. Los resultados evidenciaron que las plantas liberan compuestos orgánicos durante la fotosíntesis que, al interactuar con microorganismos del suelo, generan flujos de electrones capturados por electrodos en sistemas PMFC y BPV, produciendo pequeñas cantidades de energía útil para dispositivos de baja demanda. Se identificó que cultivos como cacao, café, banano y palma tienen potencial para aplicaciones bioenergéticas. La bioenergía, aunque aún emergente, es una alternativa viable para zonas rurales presenta bajo impacto ambiental y fácil implementación, favorece la autonomía energética y el desarrollo sostenible, contribuye a la transición hacia modelos energéticos más limpios en el país.

**PALABRAS CLAVES:** natural photosynthesis, renewable energy, bioelectrochemical cells, electricity generation.

## 6.2. ABSTRACT

This degree project examined the generation of electrical energy from natural photosynthesis as a renewable alternative for Ecuador's energy development, addressing the limited adoption of clean technologies in Santo Domingo de los Tsáchilas and the growing need to reduce dependence on fossil fuels. The study aimed to assess the technical feasibility of bioelectrochemical systems that rely on the interaction between plants, roots, soil microorganisms and electrodes to determine their potential to produce continuous and sustainable low-power electricity. The research followed a descriptive investigative and bibliographic approach, which involved scientific literature review, analysis of previous experimental studies and the design of representative diagrams of the bioelectric conversion process. The findings showed that plants release organic compounds during photosynthesis that, when metabolized by microorganisms in the soil, generate electron flows that can be captured by electrodes in PMFC and BPV systems, producing small but functional amounts of energy suitable for low-consumption devices. Crops such as cacao, coffee, bananas, and oil palm have been identified as having potential for bioenergy applications. Bioenergy, although still emerging, is a viable alternative for rural areas, it has a low environmental impact and is easy to implement, it promotes energy independence and sustainable development. It contributes to the transition to cleaner energy models in the country.

**KEYWORDS:** natural photosynthesis, renewable energy, bioelectrochemical cells, electric generation, soil microorganisms, sustainable development.

### **6.3. INTRODUCCIÓN**

Hoy en día, el uso de energías renovables se ha convertido en una prioridad mundial debido al impacto negativo de las fuentes fósiles en el medio ambiente, la creciente contaminación, el agotamiento de los recursos naturales y el cambio climático han estimulado la búsqueda de alternativas sostenibles que aseguren un equilibrio entre el desarrollo tecnológico y la preservación del medio ambiente natural. En Ecuador el aprovechamiento de recursos naturales como el sol, el viento, el agua y la biomasa representa una gran oportunidad para impulsar el desarrollo sostenible y reducir la dependencia de combustibles no renovables. Este proyecto tiene como objetivo explotar los recursos naturales disponibles para generar energía limpia.

El presente proyecto de graduación titulado “Energías Renovables: Generación de Energía Eléctrica a partir de la Fotosíntesis Natural en el Ecuador” tiene como objetivo analizar y proponer soluciones tecnológicas efectivas y sustentables basadas en procesos de fotosíntesis naturales, que contribuyan a mitigar el cambio climático, generar energía limpia y mejorar la calidad de vida de la sociedad. Esta investigación pretende demostrar que es posible convertir la energía natural en electricidad utilizando tecnologías verdes aplicadas a nivel local y nacional, con el fin de contribuir a mitigar el cambio climático y promover el uso responsable de los recursos naturales, acelerando el progreso hacia un modelo energético más ecológico y sostenible. Producir energía eléctrica utilizando mecanismos naturales como la fotosíntesis es una opción prometedora e innovadora dados los desafíos energéticos que enfrenta el mundo hoy.

El objetivo de este proyecto no es sólo verificar la viabilidad técnica de estas alternativas sino también analizar sus impactos sociales, económicos y ambientales en la práctica en Ecuador. Al combinar los fundamentos científicos con las necesidades de la sociedad, busca crear un punto de partida sólido para el progreso futuro en tecnología sostenible. En definitiva, este trabajo pretende contribuir a la transición energética del país, impulsando un modelo medioambiental y responsable, capaz de cubrir las necesidades actuales y los retos futuros.

### **6.4. MATERIAL Y MÉTODOS**

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cualitativo, de tipo descriptivo, analítico y bibliográfico, orientado al análisis sistemático de información científica relacionada con la generación de energía eléctrica a partir de procesos de fotosíntesis natural y bioelectroquímicos. El estudio es de diseño no experimental, dado que no se realizó manipulación de variables ni experimentación en laboratorio o campo, sino que se basó exclusivamente en el análisis de fuentes documentales especializadas.

Fuentes de información y materiales

Los materiales utilizados corresponden a fuentes secundarias de carácter científico y técnico, entre las que se incluyen:

- Artículos científicos indexados en bases de datos académicas como Scopus e IEEE Xplore.
- Tesis de grado y posgrado relacionadas con bioelectricidad vegetal, bioenergía y energías renovables.
- Libros especializados en fotosíntesis, bioelectroquímica y sistemas bioenergéticos.
- Informes técnicos y documentos institucionales de organismos internacionales vinculados a energías renovables y desarrollo sostenible.
- Estudios y experiencias latinoamericanas relevantes, como los proyectos Plant Microbial Fuel Cell (PMFC), Bio-Photovoltaic (BPV) y la experiencia ALINTI.

Estas fuentes constituyeron la base documental para el análisis comparativo y contextual de la bioelectricidad vegetal en el Ecuador.

La población del estudio estuvo conformada por publicaciones científicas y documentos técnicos relacionados con la generación de electricidad mediante procesos fotosintéticos y microbianos.

La muestra fue seleccionada de manera intencional y no probabilística, priorizando investigaciones:

- Publicadas en los últimos años.
- Con respaldo académico y metodológico confiable.
- Relacionadas con ecosistemas tropicales y zonas rurales.
- Vinculadas a especies vegetales de interés bioenergético.

Esta selección permitió construir un corpus documental pertinente para evaluar la aplicabilidad de estas tecnologías en el contexto ecuatoriano.

#### **6.4.1. Variables de análisis**

A partir de la literatura revisada, se identificaron y analizaron las siguientes variables:

- Variables dependientes: voltaje generado, corriente eléctrica, potencia y energía almacenada.
- Variables independientes: especies vegetales, tipo de sustrato, material y ubicación de electrodos, condiciones de iluminación, parámetros ambientales y actividad microbiana del suelo.
- Variables de control: tamaño del contenedor, condiciones de luz, riego, composición del suelo y tiempos de medición, consideradas de acuerdo con los criterios metodológicos reportados en los estudios analizados.

Estas variables fueron utilizadas como categorías analíticas para comparar resultados y tendencias reportadas en la literatura.

#### 6.4.2. Procedimiento metodológico

El procedimiento general se organizó en cinco fases:

- ·Búsqueda y recopilación de información científica en bases de datos académicas y repositorios institucionales.
- ·Selección y clasificación de las fuentes, aplicando criterios de relevancia temática, actualidad y rigor metodológico.
- ·Análisis descriptivo de los fundamentos biológicos, físicos y electroquímicos de la generación bioeléctrica mediante fotosíntesis.
- ·Análisis comparativo y analítico de sistemas BPV, PMFC e iniciativas latinoamericanas, identificando avances, limitaciones y diferencias metodológicas.

Síntesis e interpretación crítica de los resultados, contextualizando su aplicabilidad en zonas rurales del Ecuador, particularmente en la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas.

El análisis se contextualizó en la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas, caracterizada por un clima húmedo tropical y la presencia de cultivos como cacao, plátano, café y palma, frecuentemente citados en la literatura por su potencial bioeléctrico. Este contexto permitió valorar la viabilidad ambiental y social de la bioelectricidad vegetal como alternativa energética renovable en zonas rurales del país. El estudio se desarrolló bajo principios éticos de la investigación científica, garantizando la objetividad, el respeto a la propiedad intelectual, la correcta citación de las fuentes y el uso exclusivamente académico de la información analizada.

### 6.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Esta revisión de la literatura examina investigaciones previas que examinan el potencial de generación de electricidad de especies de plantas comúnmente cultivadas en Santo Domingo de los Tsáchilas, incluidas *Theobroma cacao*, *Musa paradisiaca*, *Coffea arabica* y *Elaeis guineensis*.

La revisión nos permite identificar modelos teóricos relacionados con:

- Comportamiento electroquímico registrado en entornos utilizados en sistemas PMFC y BPV,
- Influencia de las variables ambientales en la producción de energía bioeléctrica y
- Comparar el rendimiento de diferentes especies de plantas descritas en la literatura.

#### 6.5.1. Cacao (*Theobroma cacao*)

La literatura indica que el cacao normalmente produce valores eléctricos moderados y relativamente estables en sistemas bioelectroquímicos. Varias fuentes afirman que esta especie produce rendimientos estables durante el día y que durante la noche su disminución se explica por una menor actividad fotosintética.

La estabilidad del voltaje está asociada a un sustrato ligeramente ácido o neutro y una humedad regular, lo que favorece la conductividad del suelo. Estudios citados por autores como

Gómez (2023) destacan que el cacao tiene raíces finas y densidad media, lo que limita el área de transferencia de electrones, aunque permite propiedades constantes y predecibles. En general, esta especie se clasifica como un generador biológico estable pero moderadamente potente.

### **6.5.2. Plátano (*Musa paradisiaca*)**

Las revisiones de las investigaciones muestran que los plátanos producen rendimientos relativamente más altos que las variedades con raíces pequeñas. Su sistema radicular superficial y fibroso facilita las interacciones con microorganismos generadores de electricidad. Los estudios biofotovoltaicos indican que esta especie muestra un marcado aumento de voltaje durante los períodos de intensa radiación solar, lo que refleja una estrecha conexión con la fotosíntesis. Autores como Liu y Chen (2022) informaron estabilidad incluso en condiciones de nubes dispersas, lo que indica una buena adaptabilidad ecológica. Debido a su rápida tasa de crecimiento y abundante presencia en las regiones tropicales, este cultivo se considera una de las alternativas más prometedoras para aplicaciones de bioenergía a pequeña escala.

### **6.5.3. Café (*Coffa arabica*)**

Trabajos revisados por pares muestran que el café tiende a registrar valores eléctricos más bajos que los observados en el banano o la palma aceitera. Se descubrió que los sistemas que utilizan café eran muy sensibles a los cambios de humedad y temperatura, lo que provocaba fluctuaciones más pronunciadas en los parámetros eléctricos.

El pH ligeramente ácido del suelo típico de los cafetos puede influir en la actividad microbiana relacionada con la liberación y el transporte de electrones. Pese a ello, algunos estudios muestran que la especie se comporta de forma estable en el tiempo, lo que la hace adecuada para entornos rurales de bajo consumo energético.

Torres (2021) mencionó que el café se puede incorporar a modelos de bioenergía híbrida debido a la disponibilidad de desechos agrícolas útiles.

### **6.5.4. Palma aceitera (*Elaeis guineensis*)**

El documento identifica a la palma aceitera como una de las especies con mayor potencial bioelectroquímico las raíces densas y las secreciones abundantes, ricas en compuestos orgánicos, contribuyen a la actividad microbiológica del sustrato. Las fuentes informan voltajes más altos en comparación con especies como el cacao o el café, especialmente en ambientes con alta humedad y materia orgánica.

Diversos estudios han documentado un marcado aumento del voltaje durante las horas de máxima radiación solar, demostrando una fuerte dependencia del metabolismo fotosintético. Los valores registrados son incluso mayores que los de los sistemas instalados en otros países tropicales, analizado por Alinti (2024), que se atribuye a las condiciones ambientales más húmedas y ricas en materia orgánica.

#### **6.5.5. Análisis comparativo:**

Los estudios revisados utilizaron análisis estadísticos, como ANOVA o pruebas de comparación múltiple, para comparar los resultados de diferentes especies. En general, la literatura muestra diferencias significativas entre plantas con sistemas de raíces densos (p.ej., palmeras) y especies con raíces finas (p.ej., café y cacao).

Asimismo, los análisis de correlación presentados en diversos trabajos muestran una relación positiva entre la humedad superficial y la corriente, así como la radiación solar y el voltaje, lo que refuerza el papel decisivo del clima tropical en estos sistemas. La revisión muestra que la producción de bioelectricidad, basada en interacciones entre plantas y microorganismos, es un fenómeno que ha sido demostrado y documentado en muchas áreas.

Aunque la densidad de potencia suele ser limitada, la estabilidad y continuidad de la potencia la convierten en una opción adecuada para aplicaciones pequeñas. Las investigaciones confirman que:

- La palma aceitera se destaca como una de las especies más productivas debido a su estructura radicular y capacidad de secretar exudados.
- El plátano tiene un rendimiento medio, combinando eficiencia y estabilidad.
- El cacao y el café tienen valores más bajos, debido principalmente a la menor superficie expuesta a los radicales libres.

Estos modelos son consistentes con los informes de Gómez (2023) y Alinti (2024), que enfatizaron la importancia de la humedad del sustrato, la densidad de las raíces y la actividad microbiana como factores clave en la producción de electricidad.

#### **6.5.6. Limitaciones identificadas**

Los estudios revisados señalan algunas limitaciones generales:

- Características de baja densidad energética de los sistemas PMFC y BPV.
- Cambios ambientales por lluvias y cambios de temperatura.
- Las diferencias en la composición microbiana del suelo afectan la comparabilidad de los resultados.
- Informar deterioro o pérdida de efectividad de los materiales de los electrodos de larga duración.

A pesar de estas limitaciones, el documento reconoce que la vida del sistema en el sector agrícola es alta y el mantenimiento es mínimo.

#### **6.5.7. Consecuencias ambientales:**

La información recopilada muestra que los sistemas vegetales y microbianos pueden respaldar iniciativas de energía sostenible en zonas rurales. Su capacidad para aprovechar los procesos fisiológicos naturales sin afectar el crecimiento de las plantas los convierte en una

alternativa complementaria a la iluminación básica, los sensores ambientales y los dispositivos de bajo consumo energético.

El estudio también destaca beneficios ambientales como:

- Reducir las emisiones,
- Utilizar materiales de bajo impacto,
- Integración con las actividades agrícolas existentes i
- Promover la economía circular mediante el uso de la tierra y los residuos orgánicos.

La reseña decía:

Se registró potencial bioeléctrico en 4 especies analizadas.

- La palma aceitera tiene el rendimiento más alto registrado en la literatura comparada, mientras que el café tiene el rendimiento más bajo.
- La humedad del sustrato y la radiación solar son factores que determinan las propiedades bioelectroquímicas.
- Los sistemas bioeléctricos de origen vegetal son amigables con el medio ambiente y pueden adaptarse a regiones tropicales como Ecuador.
- La comparación bibliométrica debería ampliarse a estudios piloto de campo para futuras investigaciones.

## 6.6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Una evaluación científica de la producción de electricidad fotosintética en cultivos de la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas ha permitido obtener un amplio conocimiento del potencial teórico, ambiental y social que tienen los sistemas biofotovoltaicos y las microcélulas vegetales como alternativas sustentables en el panorama energético del Ecuador. Especies como *Theobroma cacao*, *Musa paradisiaca*, *Coffea arabica* y *Elaeis guineensis* son conocidas por su capacidad para promover procesos bioelectroquímica, es resultado de su estructura fisiológica, la composición del sistema radicular y las propiedades del sustrato en el que suelen crecer.

Una revisión de la literatura muestra que estas especies presentan diferencias en el potencial eléctrico que producen, relacionado tanto con la actividad fotosintética como con la liberación de compuestos orgánicos al suelo. Aunque la cantidad de energía registrada en estudios previos es limitada, su importancia es que se genera por procesos biológicos naturales, lo que abre la posibilidad de considerar estos mecanismos como fuentes de energía alternativas adicionales en zonas rurales o de difícil acceso.

Con respecto a los enfoques metodológicos presentados en estudios similares, existe la necesidad de integrar perspectivas cualitativas y cuantitativas para comprender las interacciones entre factores ambientales, características del suelo, propiedades de los electrodos y respuestas

fisiológicas de las plantas. Desde una perspectiva cualitativa, la investigación analizada enfatiza la importancia de la aceptación social de la biotecnología, la percepción de las comunidades rurales y el potencial ambiental de su adopción. Cuantitativamente, se han presentado modelos analíticos en la literatura que relacionan variables técnicas y ambientales con el desempeño de sistemas bioelectroquímicos.

A través del análisis de estudios previos se pueden extraer las siguientes conclusiones:

Potencial energético de los cultivos locales diversos estudios muestran que especies como el cacao y el plátano tienden a exhibir una mayor eficiencia bioenergética debido a la abundancia de exudados de raíces y la masa de biomasa fotosintética. Estos antecedentes sugieren que estas plantas podrían considerarse prioridades para futuras investigaciones teóricas sobre la producción de bioelectricidad en un contexto agrícola.

La literatura coincide en que la transferencia de electrones está significativamente influenciada por factores como el tipo de sustrato, la composición de la materia orgánica, el pH, la humedad del suelo y las propiedades de los materiales conductores. De manera similar, se ha observado que algunos materiales que contienen carbono utilizados como electrodos pueden mejorar el rendimiento del sistema, aumentando la importancia de estos parámetros en el análisis de la investigación.

Los estudios revisados proporcionan ejemplos conceptuales que consideran la conversión de bioelectricidad como una alternativa viable para satisfacer las necesidades energéticas básicas en comunidades con recursos limitados. Si bien estos sistemas no se consideran un reemplazo de las fuentes tradicionales, brindan un apoyo adicional consistente con políticas de desarrollo sustentable, educación ambiental y uso responsable de los recursos biológicos, desde una perspectiva académica y disciplinar, esta línea de investigación contribuye a la consolidación de conocimientos teóricos en los campos de la electroquímica, las energías renovables y la biotecnología ambiental.

Además, fomenta la reflexión crítica sobre el papel de los recursos naturales en el desarrollo de estrategias energéticas sostenibles, destacando la importancia de un enfoque responsable y contextualizado de la formación en electricidad. En general, la revisión de la literatura confirma que la producción de energía fotosintética representa una alternativa conceptualmente sólida, científicamente sólida y ambientalmente sólida.

El análisis realizado abre oportunidades para futuras investigaciones para obtener una comprensión más profunda de los mecanismos bioelectroquímicos, mejorar la comprensión teórica y evaluar su importancia en el marco de la transición energética sostenible en Ecuador.

## 6.7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Alinti. (2024). proyecto innovador desarrollado en Perú. artículo informativo sobre tecnología de generación de energía mediante plantas.
- Barahona Marin, A. R. (2025). Generación de energía eléctrica por medio de biomasa orgánica en Santo Domingo, Ecuador. Revista Científica Multidisciplinar G-Nerando, Pág. 1569.
- Barrios, Celina E., Albiter, Elim, & Zanella, Rodolfo. (2015). La fotosíntesis artificial, una alternativa para la producción de combustibles. Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología, 8(15), 6-21. Epub 05 de junio de 2021. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2015.15.53813>
- Cáceres, G., Aguilar, R., & Medina, J. (2018). Evaluación del potencial energético de sistemas bioelectroquímicos aplicados en comunidades rurales del Perú. Revista de Energías Renovables, 3(2), 45-53.
- Chong, P.L., et al. (2025). Plant microbial fuel cells: A comprehensive review. (revista).
- Gomez, P. (2023). Aplicación de la fotosíntesis artificial en la generación de energía limpia. Revista Energía Verde, 45-58.
- Greenman, J., et al. (2024). Energy harvesting from plants using hybrid microbial fuel cells. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology.
- Helder, M., Strik, D., Hamelers, B., & Buisman, C. (2012). The oxygen reduction reaction in plant microbial fuel cells. Renewable Energy, 45, 5-10. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.02.011>
- Jesús, t. (Octubre de 2025). Protocolo para la generación de energía eléctrica mediante la fotosíntesis en plantas (PMFC y BPV) en condiciones tropicales de Santo Domingo. Documento inédito.
- Logan, B. E., & Regan, J. M. (2006). Electricity-producing bacterial communities in microbial fuel cells. Trends in Microbiology, 14(12), 512-518. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2006.10.003>
- López, A., & Arias, E. (2020). Sistemas biofotovoltaicos en Latinoamérica: avances y perspectivas. Revista Iberoamericana de Energía, 12(1), 77-89.
- Lui. (2022). Sistemas biofotovoltaicos (BPV) y generación de energía a partir de plantas y microorganismos. Revista de Energía Verde. Energía Verde.
- Madrid, F.M.G., et al. (2023). In Situ Evaluation of Different CAM Plants as... Plants (MDPI). (sobre impacto de especies y rendimiento en PMFC).
- Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables. (2020). Plan Nacional de Eficiencia Energética del Ecuador 2030. Quito, Ecuador.
- Ministerio del Ambiente. (2019). Inventario de biodiversidad y ecosistemas del Ecuador. Quito, Ecuador.

- NTT DATA Foundation. A biotechnology that generates electricity from plants wins the Global eAwards 2024 (ALINTI).
- Paredes, C., & Zambrano, M. (2021). Potencial de aprovechamiento energético en cultivos tropicales de la región Costa del Ecuador. *Revista Técnica de Energía*, 15(3), 112-121.
- Proyecto Alinti. (2015). Informe técnico de desarrollo de dispositivos bioenergéticos a base de plantas. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Rezaei, A., Karami, Z., Feli, F., & Aber, S. (2023). Oxygen reduction reaction enhancement in microbial fuel cell cathode using cesium phosphomolybdate electrocatalyst. *Fuel*, 352, 129040.
- Strik, D.P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., & Buisman, C. J. N. (2008). Solar energy powered microbial fuel cell. *Environmental Science & Technology*, 42(6), 2295-2300. <https://doi.org/10.1021/es702438g>
- Torres, M., (2021). Avances en biotecnología aplicada a la producción de energía eléctrica sostenible. *Revista Latinoamericana de Energía y Medio Ambiente*, 78-91.
- Van Limbergen, T. et al. (2022). Plant microbial fuel cells from the perspective of photovoltaics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Vijay, A., & Mohan, S. V. (2019). Bioelectricity generation from photosynthetic systems: A review on potential and challenges. *Bioresource Technology Reports*, 7, 100225. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100225>



**RELACIÓN SOSTENIBLE ENTRE ENERGÍA  
RENOVABLE, ECONOMÍA CIRCULAR Y CONSUMO DE  
ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL ECUADOR.**

**SUSTAINABLE RELATIONSHIP BETWEEN RENEWABLE  
ENERGY, CIRCULAR ECONOMY AND ELECTRICITY  
CONSUMPTION IN ECUADOR**

**Vargas Ostaiza Luis Alfredo**

Instituto Superior Tecnológico Tsáchila  
luisvargasostaiza@tsachila.edu.ec  
<https://orcid.org/0009-0008-4380-5040>  
Santo Domingo – Ecuador

**Yugcha Jara Edgar Javier**

Instituto Superior Tecnológico Tsáchila  
edgaryugchajara@tsachila.edu.ec  
<https://orcid.org/0009-0008-0960-4480>  
Santo Domingo – Ecuador

**Ing. Marcelo Edwin Sandoval Sandoval, Msc.**

Instituto Superior Tecnológico Tsáchila  
edwinsandoval@tsachila.edu.ec  
<https://orcid.org/0000-0002-4611-9483>  
Santo Domingo - Ecuador

## INDICE

<b>7.1. RESUMEN</b> .....	106
<b>7.2. ABSTRACT</b> .....	107
<b>7.3. INTRODUCCIÓN</b> .....	108
<b>7.4. MATERIAL Y MÉTODOS</b> .....	109
<b>7.4.1. Fuentes de energía primaria</b> .....	109
<b>7.4.2. Fuentes de energía secundaria</b> .....	110
<b>7.4.3. Producción de energía primaria en Ecuador</b> .....	110
<b>7.4.4. Producción de energía secundaria</b> .....	111
<b>7.4.6. Evolución del uso de energías renovables en el Ecuador</b> .....	112
<b>7.4.7. Participación de las energías renovables en la matriz eléctrica</b> .....	112
<b>6.5. 7.4.8. Eficiencia energética como eje de la economía circular</b> .....	112
<b>7.4.9. Comportamiento del consumo energético en Ecuador</b> .....	112
<b>7.4.10. Demanda energética y su importancia en el contexto nacional</b> .....	113
<b>7.5. ANALISIS DE RESULTADOS</b> .....	113
<b>7.5.2. Generación eléctrica y participación de energías renovables</b> .....	114
<b>7.6. DISCUSIÓN</b> .....	115

## 7.1. RESUMEN

La presente investigación, titulada “Relación sostenible entre la energía renovable, la economía circular y el consumo de energía eléctrica en el Ecuador”, tuvo como objetivo de analizar la evolución y el impacto de estos elementos en la matriz energética nacional y en los patrones de consumo. Para ello, se aplicó una metodología bibliográfica con enfoque mixto, que combinó el análisis cuantitativo de datos oficiales sobre generación y consumo energético, junto con una revisión cualitativa del marco normativo y las políticas públicas relacionadas. Los resultados mostraron que, aunque Ecuador cuenta con un gran potencial en energías renovables principalmente hidroeléctrica, solar, eólica y biomasa, su aprovechamiento está limitado por factores económicos y sociales.

Además, se identificó que la economía circular representa una estrategia fundamental para optimizar el uso de recursos, reducir residuos y promover un consumo energético más eficiente y responsable. Las políticas públicas incluyeron parcialmente estos enfoques, su implementación enfrenta desafíos relacionados con la conciencia ciudadana y el financiamiento tecnológico. Se concluyó que integrar efectivamente las energías renovables con las prácticas de economía circular y la gestión del consumo energético es vital para garantizar la sostenibilidad ambiental y el desarrollo económico del país. Esta integración permitiría enfrentar la creciente demanda eléctrica de manera estable y compatible con los objetivos de desarrollo sostenible, contribuyendo a mejorar la calidad de vida y reducir el impacto ambiental.

**PALABRAS CLAVE:** Energía renovable, economía circular, consumo de energía eléctrica, sostenibilidad energética, matriz energética, Ecuador.

## 7.2. ABSTRACT

The present research, entitled "Sustainable Relationship between Renewable Energy, Circular Economy, and Electric Energy Consumption in Ecuador," aimed to analyze the evolution and impact of these elements on the national energy matrix and consumption patterns. To achieve this, a bibliographic methodology with a mixed approach was applied, combining quantitative analysis of official data on energy generation and consumption with a qualitative review of the regulatory framework and related public policies. The results showed that, although Ecuador possesses great potential in renewable energies, mainly hydroelectric, solar, wind, and biomass—their exploitation is limited by economic and social factors. Additionally, it was identified that the circular economy represents a fundamental strategy to optimize resource use, reduce waste, and promote more efficient and responsible energy consumption. Public policies partially included these approaches; however, their implementation faces challenges related to citizen awareness and technological financing. It was concluded that effectively integrating renewable energies with circular economy practices and energy consumption management is vital to ensuring the country's environmental sustainability and economic development. This integration would allow for meeting the growing electricity demand in a stable manner that aligns with sustainable development goals, contributing to improved quality of life and reduced environmental impact.

**KEYWORDS:** Renewable energy, circular economy, electric energy consumption, energy sustainability, energy matrix, Ecuador.

### 7.3. INTRODUCCIÓN

En el Ecuador, se ha buscado fortalecer su transición hacia un modelo energético más sostenible, que reduzcan el impacto ambiental y promoviendo el uso de fuentes renovables. La dependencia de energía eléctrica proveniente de fuentes no renovables que incrementa los riesgos económicos, ambientales y de sostenibilidad en el sistema eléctrico, así como, los patrones de consumo poco eficientes, han evidenciado la necesidad de adoptar estrategias sostenibles que articulen la energía renovable con los principios de la economía circular, frente a un modelo lineal tradicional promoviendo la reutilización de materiales, la eficiencia energética y la reducción de residuos para un consumo eléctrico más responsable, eficiente y compatible con los objetivos de desarrollo sostenible del país.

El tema destaca su relevancia porque el consumo de energía forma parte de la vida cotidiana y refleja directamente los hábitos de la sociedad. En muchos hogares y sectores productivos del país, aún prevalece una cultura de uso excesivo y poco consciente de la electricidad. Promover un cambio hacia prácticas más responsables no solo significa ahorrar energía, sino también cuidar los recursos naturales, reducir los costos y mejorar la calidad de vida. Así mismo comprender como la economía circular y las energías alternativas pueden influir en ese cambio clave para avanzar hacia un futuro más equilibrado y sostenible para todos. Este estudio se propone analizar dicha relación sostenible, explorando la evolución de las energías renovables en la matriz energética del Ecuador, la integración de la economía circular en las políticas públicas y su impacto en los patrones de consumo energético. Se busca además identificar las oportunidades y desafíos que enfrenta el país durante el proceso de diversificación energética y transición hacia un modelo más limpio y eficiente.

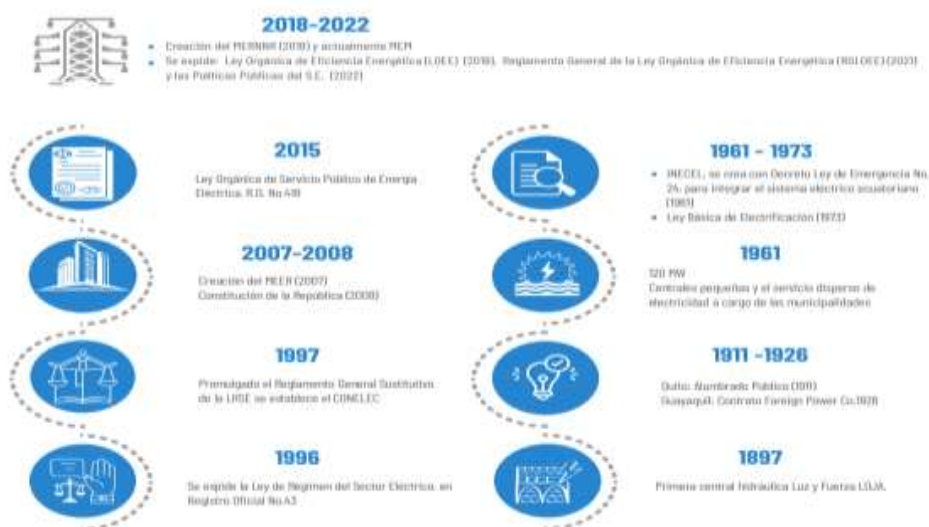
Comprender esta relación integral es vital, ya que el consumo de energía eléctrica está íntimamente ligado a la calidad de vida y desarrollo económico, y su transformación puede ser clave para preservar los recursos naturales y lograr una economía más equitativa y respetuosa con el medio ambiente. De esta forma, el presente trabajo aporta una visión actualizada y relevante al debate sobre sostenibilidad energética en Ecuador, contribuyendo a orientar futuras políticas y prácticas que integren la generación de energía renovable, la economía circular y el consumo consciente para alcanzar un desarrollo sostenible a nivel nacional.

## 7.4. MATERIAL Y MÉTODOS

Con la Constitución de 2008 y la promulgación de la LOSPEE en 2015, el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable asumió un papel central en la planificación y regulación del sector, elaborando el Plan Maestro de Electricidad (PME) y el Plan Nacional de Eficiencia Energética (PLANEE). La fusión de ministerios en 2018 dio lugar al actual Ministerio de Energía y Minas, que continúa liderando estas estrategias. Además, la normativa y reglamentos recientes, incluyendo la LOEE y su reglamento de 2022, han consolidado la eficiencia energética como política de Estado, promoviendo el uso racional, sostenible y responsable de la energía en todo el país (MERNNR, 2021).

**Figura 10**

*Línea de tiempo sector eléctrico*



*Nota.* la figura 1 es obtenida del documento que presenta el Ministerio de Energía y Minas del año 2021, detallando la evolución histórica del sector eléctrico ecuatoriano pagina 7.

### Fuentes de energía

Según la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE, 2011):

Las principales fuentes de energía se clasifican en primarias y secundarias.

#### 7.4.1. Fuentes de energía primaria

Se entiende por energía primaria a las fuentes de energía en su estado natural, es decir que no han sufrido ningún tipo de transformación física o química mediante la intervención humana. Se las puede obtener de la naturaleza, ya sea: en forma directa como en el caso de la energía

hidráulica, solar, la leña y otros combustibles vegetales; o después de un proceso de extracción como el petróleo, carbón mineral, geoenergía (pág. 16)

#### **7.4.2. Fuentes de energía secundaria**

Se denomina energía secundaria a los productos energéticos que se obtienen mediante la transformación de fuentes de origen primario o de otras fuentes secundarias. Las fuentes y formas de energía secundaria consideradas para el balance energético, se las ha clasificado de acuerdo a la fuente primaria de la que provienen y son las siguientes:

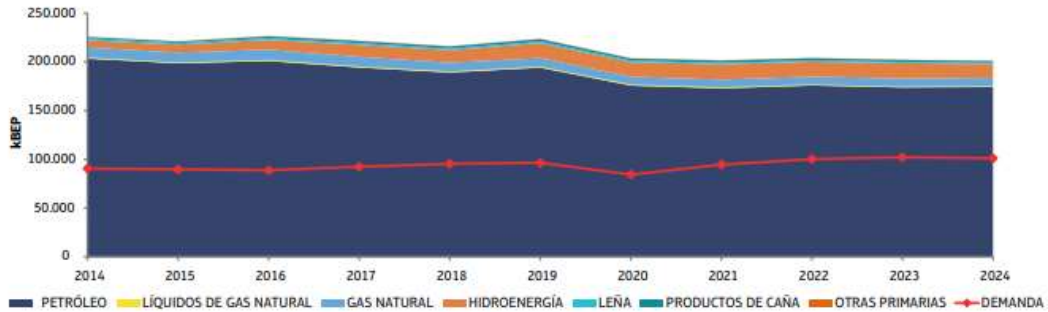
- Electricidad
- Productos petroleros secundarios
- Derivados de carbón mineral
- Coque de carbón mineral
- Gas de coquería
- Gas de Alto Horno
- Derivados de biomasa o bio-combustibles
- Carbón vegetal
- Biocombustibles
- Etanol
- Biodiesel
- Biogás (págs. 21-25).

#### **7.4.3. Producción de energía primaria en Ecuador**

Según el Ministerio de Energía y Minas (MEM, 2024):

Durante el periodo de análisis comprendido entre 2014 y 2024, el petróleo se mantuvo como la principal fuente de energía producida en el país. La producción anual de crudo registró un promedio de 187 millones de barriles anuales durante este período, alcanzando su máximo histórico en 2014, con una producción de 203 millones de barriles. En contraste, las fuentes renovables tuvieron una participación menor en la producción de energía primaria frente a las fuentes fósiles. Sin embargo, entre 2014 y 2024, la producción de energía renovable creció 61,9%, impulsada principalmente por la incorporación de nuevas centrales de generación hidroeléctrica y eólica durante este período. (pág. 26)

**Figura 11**  
Evolución de la producción de energía primaria (kBEP)



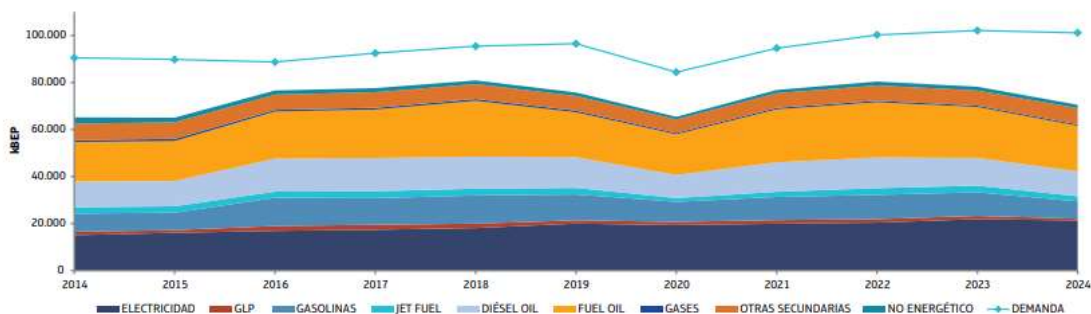
**Nota.** El gráfico representa la producción de la energía prima durante este tiempo. Por el Ministerio de Ambiente y Energía 2024.

#### 7.4.4. Producción de energía secundaria

De acuerdo con el Ministerio de Energía y Minas (2024):

La producción de energía secundaria y la demanda energética en el país entre 2014 y 2024 a lo largo de este período, se observa que la demanda energética supera consistentemente a la producción de energía secundaria, lo que ha hecho necesario complementar la oferta interna mediante la importación de energéticos secundarios para cubrir parte de la demanda existente. Entre 2014 y 2024 la producción de energía secundaria mostró un crecimiento de 8,2 %, pasando de 65,2 millones de BEP a 70,5 millones de BEP. Las principales fuentes de energía secundaria producidas en Ecuador durante este período han sido fuel oil con 27,2 %, electricidad con 25,4 %, seguido por diésel oil con 16,5 % y gasolinas con 13,2 %. (pág. 27)

**Figura 12**  
Evolución de la producción de energía secundaria (kBEP)



**Nota.** En el grafico se pude observar el tiempo de evolución de la energía secundaria, realizada por el Balance Energético Nacional 2024.

#### 7.4.5. Energías renovables en Ecuador

Según Romero, Toala, Carvajal y Lino (2025):

Las energías renovables son esenciales para diversificar la matriz energética de Ecuador, reducir la dependencia de combustibles fósiles y mitigar los efectos del cambio climático. Estas fuentes incluyen la hidroeléctrica, solar, eólica y biomasa, y su integración contribuye a una mayor seguridad energética y sostenibilidad ambiental. Según un estudio publicado en 2025, las energías renovables han demostrado impactos positivos en zonas rurales del país, mejorando el acceso a la energía y promoviendo el desarrollo económico local. (pág. 51)

#### **7.4.6. Evolución del uso de energías renovables en el Ecuador**

El Ecuador ha experimentado avances significativos en la incorporación de energías renovables, principalmente a partir del desarrollo del parque hidroeléctrico nacional. De acuerdo con el Balance Energético Nacional 2024: “La capacidad instalada de generación eléctrica renovable representó el 61,18 % de la potencia nominal total del país en 2023, siendo la energía hidráulica la fuente predominante” (MAE, 2025, pág. 31).

#### **7.4.7. Participación de las energías renovables en la matriz eléctrica**

La matriz eléctrica ecuatoriana se caracteriza por una alta participación de fuentes renovables, especialmente la energía hidráulica. Según el Atlas del Sector Eléctrico Ecuatoriano 2023, la potencia instalada renovable alcanzó aproximadamente 5.445 MW, lo que equivale a más del 60 % de la capacidad total del sistema de generación eléctrica. Dentro de este grupo, la energía hidroeléctrica concentra más del 95 % de la potencia renovable instalada, seguida por fuentes como la biomasa, la energía eólica, la solar fotovoltaica y el biogás (ARCERNNR, 2023).

#### **6.5. 7.4.8. Eficiencia energética como eje de la economía circular**

La eficiencia energética se refiere a la aplicación de acciones orientadas a reducir el consumo de energía sin afectar la calidad de los servicios ni los procesos productivos. “Desde el enfoque de la economía circular, este concepto permite optimizar el uso de los recursos, reducir desperdicios y facilitar la transición hacia sistemas energéticos más sostenibles, con beneficios ambientales y económicos asociados” (Retondo, Serrano, Mancilla, & Teseyra, 2023).

#### **7.4.9. Comportamiento del consumo energético en Ecuador**

El comportamiento del consumo energético en el Ecuador refleja una tendencia ascendente vinculada al crecimiento del sector terciario y a la progresiva electrificación de las actividades económicas. Según Cadena y Tigua, entre 2020 y 2040 se proyecta un incremento aproximado del 87 % en la demanda energética de dicho sector, siendo la electricidad la fuente predominante con una participación estimada del 76 % del total (Cadena & Tigua, 2025). Este escenario evidencia la

necesidad de fortalecer políticas orientadas a la eficiencia energética y la diversificación de la matriz, especialmente en los sectores de servicios, comercio y tecnología, donde el consumo eléctrico aumenta de manera sostenida.

#### **7.4.10. Demanda energética y su importancia en el contexto nacional**

La demanda energética representa la cantidad de energía que una sociedad requiere para sostener sus actividades cotidianas, productivas y económicas. Este concepto refleja la forma en que la energía es utilizada y distribuida entre los distintos sectores. En el Ecuador, el análisis de la demanda energética es fundamental para entender cómo funciona y evoluciona el sistema energético nacional, de tal manera que ayuda a reconocer cómo se consume la energía, qué tan exigente es la demanda para la oferta disponible y qué posibilidades existen para usarla de manera más eficiente y sostenible (MAE, 2025).

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque con tendencia cualitativa, dado que no solo realiza un diagnóstico de la problemática detectada, sino que pretende plantear alternativas concretas para dar solución a los desafíos relacionados con el aprovechamiento eficiente de energías renovables, la aplicación de la economía circular y la gestión del consumo eléctrico en Ecuador. Se busca argumentar y proponer cómo estas estrategias contribuyen a una transición energética sostenible y responsable trabajando desde un análisis crítico y fundamentado en documentos oficiales y literatura especializada. Se describen las características del sistema energético ecuatoriano, la participación de las energías renovables, los principios de eficiencia energética y su relación con la economía circular, para posteriormente analizar cómo estos elementos se articulan dentro de la planificación energética nacional. El diseño es transversal, ya que analiza la situación del sistema energético y la implementación de políticas en un periodo determinado sin seguimiento a largo plazo o intervención directa. La investigación brinda un panorama actualizado y comparativo para comprender la relación y los procesos vigentes en el país.

### **7.5. ANALISIS DE RESULTADOS**

#### **7.5.1. Demanda energética y consumo eléctrico en el Ecuador**

La demanda energética del Ecuador presenta una estructura altamente concentrada en el sector transporte. De acuerdo con el Balance Energético Nacional 2024, el transporte representa más del 50 % del consumo energético final, seguido por el sector industrial con un 15 al 20% y el sector residencial con el consumo del 10 al 15%. Esta distribución evidencia una elevada dependencia de combustibles fósiles en el consumo energético nacional.

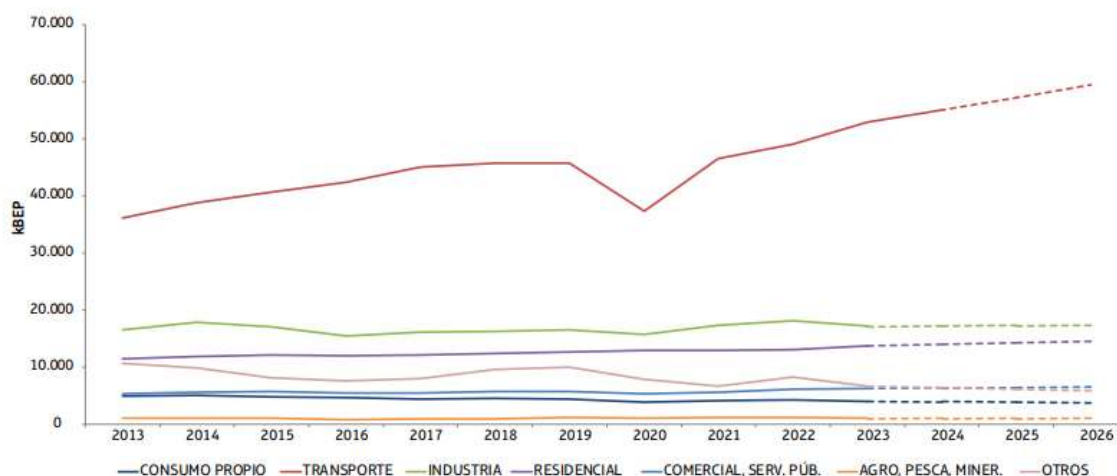
**Tabla 6**  
*Demanda energética*

Sector	Participación (%)
<b>Transporte</b>	51,9
<b>Industria</b>	16,6
<b>Residencial</b>	13,5
<b>Comercial y servicios públicos</b>	6,1
<b>Agro, pesca y minería</b>	1,1
<b>Construcción y otros</b>	6,7
<b>Consumo propio</b>	4,1

*Nota.* Elaboración propia a partir del Balance Energético Nacional (MEM, 2024).

En cuanto al consumo de energía eléctrica, la información operativa del sistema eléctrico muestra una tendencia creciente de la demanda, asociada al crecimiento poblacional, la expansión urbana y el desarrollo de actividades productivas.

**Figura 13**  
*Proyección de demanda de energía por sector (kBEP)*



*Nota.* Elaborado por el Ministerio de Energías y Minas (MEM, 2024)

Se espera que la demanda de energía continúe en aumento en los próximos años como lo indica la figura, siendo el sector del transporte como principal consumidor, lo que incrementará la presión sobre el sistema energético y refuerza la necesidad de fortalecer la planificación energética y promover medidas de eficiencia en el consumo.

### 7.5.2. Generación eléctrica y participación de energías renovables

La matriz eléctrica ecuatoriana se encuentra dominada por fuentes renovables. Según el Atlas del Sector Eléctrico Ecuatoriano 2023, la capacidad instalada total de generación eléctrica supera los 8.800 MW, de los cuales más del 60 % corresponde a fuentes renovables convencionales y no convencionales.

**Tabla 7**  
*Capacidad de generación eléctrica*

<b>Tipo de fuente</b>	<b>Capacidad instalada (MW)</b>	<b>%</b>
<b>Renovables totales</b>	5.445,10	61,18
<b>Hidráulica</b>	5.192,30	<b>95,36 (Renovable Convencional)</b>
<b>No renovables</b>	3.454,47	
<b>Total</b>	8.899,58	100

*Nota.* Elaboración propia a partir del Atlas del sector Eléctrico Ecuatoriano (ARCERNNR, 2023).

Los registros de energía neta producida evidencian que la generación hidroeléctrica aporta la mayor proporción de la energía eléctrica producida anualmente, mientras que la generación térmica cumple un rol complementario.

## 7.6. DISCUSIÓN

En conjunto, el análisis realizado demuestra que el Ecuador cuenta con un importante potencial para avanzar hacia un sistema energético más sostenible; sin embargo, enfrenta desafíos estructurales asociados al crecimiento del consumo, la dependencia hidrológica y las limitaciones operativas. La relación entre economía circular, energías renovables y consumo energético se manifiesta en la necesidad de optimizar el uso de la energía, diversificar la matriz energética y reducir la presión sobre los recursos disponibles, como elementos clave para fortalecer la sostenibilidad y seguridad energética del país.

La revisión conjunta de los resultados obtenidos permite comprender que el sistema eléctrico ecuatoriano no enfrenta un problema de falta de recursos para la generación de energía, sino de cómo estos recursos son gestionados y aprovechados. Aunque la alta participación de energías renovables representa una ventaja importante para el país, los eventos recientes asociados a períodos de estiaje y a limitaciones operativas han evidenciado que la estructura actual del sistema eléctrico aún presenta debilidades. Estas debilidades no se explican únicamente por la dependencia hidroeléctrica, sino también por el crecimiento del consumo eléctrico y por la necesidad de una planificación más integrada entre generación, operación y uso final de la energía.

En esta investigación, los resultados muestran que la economía circular adquiere relevancia como un enfoque que permite replantear la relación entre generación y consumo eléctrico. Más allá de incorporar nuevas centrales renovables, se vuelve necesario priorizar el uso eficiente de la electricidad, reducir pérdidas y fomentar hábitos de consumo más responsables. Asimismo, la diversificación de la matriz eléctrica mediante fuentes renovables no convencionales ofrece una oportunidad para complementar la generación hidroeléctrica y mejorar el desempeño del sistema frente a escenarios adversos. Por ende, el análisis evidencia que la sostenibilidad del

sistema eléctrico ecuatoriano depende de un equilibrio entre generación renovable, gestión eficiente del consumo y aplicación práctica de principios de economía circular.

### **7.7. CONCLUSIÓN**

Con el análisis de fuentes oficiales y estadísticas nacionales permitió evidenciar que el sistema energético ecuatoriano presenta una diferencia significativa entre la generación eléctrica y el comportamiento de consumo energético. Si bien en el Ecuador la generación eléctrica se sustenta mayoritariamente en fuentes renovables convencionales y No convencionales, principalmente de las hidroeléctricas (E.R. Convencional), el consumo energético total se distribuye de manera desigual entre los distintos sectores. Donde el sector del transporte concentra la mayor demanda energética con más del 50% debido a su alta dependencia de combustibles fósiles; no obstante, los sectores industrial y residencial también presentan una participación relevante, el sector industrial tiene una demanda energética nacional aproximada del 15% y 20% asociada al uso intensivo de electricidad en procesos productivos, manufactura y agroindustria, así mismo el sector residencial representa de entre el 10 y 15% de consumo energético.

En el Ecuador se evidencia que la matriz eléctrica nacional posee un importante potencial en energías renovables, donde la energía hidroeléctrica representa entre el 90 y 95% de la generación eléctrica total, esta situación ha permitido reducir la dependencia de generación eléctrica con fuentes no renovables, sin embargo, esta fuente de generación presenta una vulnerabilidad ante las condiciones climáticas cambiantes especialmente en los periodos de estiaje con alta duración, como lo sucedido en los años 2023 y 2024, que hubo la disminución de los caudales hídricos afectó la capacidad de generación hidroeléctrica y obligó a incrementar el uso de generación térmica.

Finalmente, se concluye que la relación sostenible entre energías renovables, economía circular, generación y consumo de energía eléctrica representa un desafío estratégico para el Ecuador. El fortalecimiento de esta relación no solo trata sobre ampliar la participación de fuentes renovables no convencionales, sino también consolidar políticas orientadas a la eficiencia energética, el consumo responsable y la reducción de pérdidas en el sistema eléctrico. La integración paulatina de la economía circular permitirá reducir la dependencia de combustibles fósiles y favorecerá al país permitiendo el uso más eficiente de los recursos energéticos, reducir la presión sobre las fuentes de generación y avanzar hacia un sistema energético más estable, equilibrado y acorde con las condiciones económicas, sociales y ambientales del Ecuador.

### 7.8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARCERNNR. (2023). *AGENCIA DE REGULACION Y CONTROL DE ENERGIA Y RECURSOS NO RENOVABLES* . Obtenido de ATLAS DEL SECTOR ELECTRICO ECUATORIANO: <https://arconel.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2024/07/Atlas-del-Sector-Elctrico-Ecuatoriano-2023.pdf?ref=youtopiaecuador.com>
- Bernal, C. (2016). *Metodologia de la Investigacion*. Colombia: Pearson.
- Caballero Lopez, J. E. (09 de 2009). <http://scielo.isciii.es>. Obtenido de <http://scielo.isciii.es/pdf/mesetra/v55n216/revision.pdf>
- Cadena, J., & Tigua, Y. (2025). *Análisis del consumo energético del sector terciario de la economía ecuatoriana*. Obtenido de Universidad de Guayaquil: <https://repositorio.ug.edu.ec/server/api/core/bitstreams/3ea2444e-d76a-4deb-a4ba-562b53862d1d/content>
- John, A. (2016). *Normas Basicas de Higiene del Entorno en la atención sanitaria*. India: Organizacion Mundial de la Salud. Obtenido de <http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/246209/9789243547237-spa.pdf;jsessionid=98A5D7C69806F077F4D7F5B862DCA0BB?sequence=1>
- MAE. (2025). *MINISTERIO DE AMBIENTE Y ENERGÍA*. Obtenido de BALANCE ENERGÉTICO NACIONAL 2024: [https://www.ambienteyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2025/09/BEN\\_24\\_compressed-comprimido-1.pdf](https://www.ambienteyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2025/09/BEN_24_compressed-comprimido-1.pdf)
- MEM. (AGOSTO de 2024). *MINISTERI DE ENERGIA Y MINAS* . Obtenido de BALANCE ENERGETICO NACIONAL 2023: <https://www.geoenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2024/08/Balance-Energetico-Nacional-2023.pdf>
- MEM. (2024). *Ministerio de Energía y Minas del Ecuador*. Obtenido de Balance Energético Nacional 2023-Capitulo 1: [https://www.ambienteyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2025/09/BEN\\_24-CAPITULO\\_1.pdf](https://www.ambienteyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2025/09/BEN_24-CAPITULO_1.pdf)
- MERNNR. (2021). *Ministerio de Electricidad y Energía No Renovable*. Obtenido de Plan Maestro de Electricidad Capitulo 2: <https://www.celec.gob.ec/wp-content/uploads/2023/02/Plan-Maestro-de-Electricidad.pdf>
- OLADE. (2011). *Organización Latinoamericana de Energía* . Obtenido de Manual de estadísticas energéticas: <https://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/oldo179.pdf>

Retondo, S., Serrano, M., Mancilla, J., & Teseyra, R. (SEPTIEMBRE de 2023). *XX Congreso Latino-Iberoamericano de Gestión Tecnológica y de la Innovación ALTEC*. Obtenido de Economía circular: Claves para la transición energética: <file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Econom%C3%ADa%20circular.%20Claves%20para%20la%20transici%C3%B3n%20energ%C3%A9tica.pdf>

Romero, M., Toala, M., Carvajal, D., & Lino, V. (06 de 09 de 2025). *InnovaSciT*. Obtenido de Energías renovables en sectores rurales del Ecuador: revisión sistemática de la literatura: <https://innovascit.com/index.php/1/article/view/75/182>

# Sistema Eléctrico de Potencia del Ecuador: Análisis técnico, normativo y tecnológico

El "Sistema Eléctrico de Potencia del Ecuador: **Análisis técnico, normativo y tecnológico**" es una obra que ofrece una visión integral de los desafíos, avances y perspectivas del sector eléctrico ecuatoriano. Dirigido a profesionales, estudiantes e investigadores del ámbito energético, este libro proporciona una exploración profunda de las principales áreas técnicas y tecnológicas del sistema de distribución y generación eléctrica en el país.

A lo largo de sus capítulos, los lectores encontrarán un análisis detallado de:

- » las redes aéreas y subterráneas de medio voltaje,
- » el uso de tecnologías avanzadas como la fibra óptica para la optimización del monitoreo y control de subestaciones,
- » el impacto de las energías renovables como alternativa energética en Ecuador,
- » el estado y mantenimiento de los transformadores,
- » la automatización de las redes de alto voltaje y el rol fundamental de las protecciones digitales.

Con el respaldo de la normativa ecuatoriana, el autor invita a reflexionar sobre las estrategias necesarias para **modernizar y fortalecer el sistema eléctrico**, promoviendo la integración de soluciones limpias, eficientes y sostenibles.

 **EDITORIAL**

[msmeditorial@gmail.com](mailto:msmeditorial@gmail.com)

ISBN: 978-9907-9506-2-5



9 789907 950625