

**Análisis del estado del arte del uso de tecnologías de transmisión de energía eléctrica
Analysis of the State of the Art in the use of electric power transmission technologies***Michael Alexander Ardila Romero; Mgtr. William Paúl Pazuña Naranjo.***INVESTIGACIÓN Y
DESARROLLO TECNOLÓGICO****Julio - diciembre, V°4-N°2;
2023**

- ✓ **Recibido:** 30/11/2023
- ✓ **Aceptado:** 04/12/2023
- ✓ **Publicado:** 30/12/2023

PAÍS

- 📍 Ecuador, La Maná
- 📍 Ecuador, La Maná

INSTITUCIÓN

- Institución o Universidad: Universidad Técnica de Cotopaxi
- Institución o Universidad: Universidad Técnica de Cotopaxi

CORREO:

- ✉ michael.ardila1309@utc.edu.ec
- ✉ william.pazuna2@utc.edu.ec

ORCID:

- 🌐 <https://orcid.org/0009-0002-6220-7165>
- 🌐 <https://orcid.org/0000-0003-0159-6734>

FORMATO DE CITA APA.

Ardila, M. Pazuña, W. (2023). Análisis del estado del arte del uso de tecnologías de transmisión de energía eléctrica. *Revista G-ner@ndo*, V°4 (N°2). 759 – 781.

Resumen

El artículo centra su atención en el examen de la literatura científico-técnica relacionada con las tecnologías que posibilitan el proceso de transición energética. Se resalta la inclinación hacia una generación más descentralizada, basada en el uso de tecnología de energía eléctrica con capacidad de almacenamiento y adaptabilidad en la demanda. Para este fin se utiliza métodos de inclusión y exclusión con el cual se logra obtener una base sólida de 21 artículos, conseguidos de varias revistas científicas. En cada una de ellas se identifica las tecnologías propuestas para la transmisión de energía eléctrica con lo que finalmente se enfatiza que la efectividad de la transición energética dependerá de la adopción de tecnologías útiles por parte de un sistema social, y se destaca la relevancia particular de la movilidad en este contexto. La importancia de las redes inteligentes se centra en optimizar las conexiones entre quienes producen y consumen energía, ofreciendo ventajas como una mayor confiabilidad, gestión activa de la demanda y sostenibilidad ambiental. Además, se resalta la necesidad de adaptar la infraestructura eléctrica existente para integrar cantidades significativas de energía renovable. Aunque la dependencia de combustibles fósiles está en declive, hay que tener en cuenta que la elección de la tecnología de transmisión dependerá de diversos factores, como la distancia de transmisión, la capacidad de carga, los costos asociados y las aplicaciones específicas. En la sección sobre HVDC, se destaca su eficiencia al transmitir electricidad a grandes distancias y su habilidad para conectar sistemas de corriente alterna con diferentes frecuencias.

Palabras clave: Transmisión de energía eléctrica, tecnologías de transmisión, estado del arte, inteligencia artificial, corriente alterna.

Abstract

The article focuses on examining scientific and technical literature related to technologies facilitating the energy transition process. It emphasizes a shift towards more decentralized generation, based on the use of electrical energy technology with storage capacity and adaptability to demand. In this regard, inclusion and exclusion methods are employed, resulting in a solid base of 21 articles gathered from various scientific journals. Each article identifies proposed technologies for electrical energy transmission, emphasizing that the effectiveness of the energy transition depends on the adoption of useful technologies by a social system. The particular relevance of mobility in this context is highlighted. The importance of smart grids lies in optimizing connections between energy producers and consumers, offering advantages such as increased reliability, active demand management, and environmental sustainability. Additionally, the need to adapt existing electrical infrastructure to integrate significant amounts of renewable energy is underscored. While the dependence on fossil fuels is declining, it's crucial to consider that the choice of transmission technology depends on various factors such as transmission distance, load capacity, associated costs, and specific applications. In the section on HVDC, its efficiency in transmitting electricity over long distances and its ability to connect alternating current systems with different frequencies are highlighted.

Keywords: Transmission of electrical energy, transmission technologies, state of the art, artificial intelligence, alternating current.

Keywords: Strategies; Pre-professional internships and graduate profile

Introducción

Hoy en día, existe una necesidad considerable de energía en diferentes ámbitos, incluidos la industria, el comercio, la agricultura, el transporte, las comunicaciones y las aplicaciones residenciales. Principalmente, este requisito se cumple mediante el empleo de combustibles fósiles, mientras que las fuentes de energía no renovables sirven predominantemente para generar electricidad. Sin embargo, se prevé un cambio hacia un futuro en el que las fuentes de energía renovable desempeñarán un papel central en la producción de electricidad (Pérez, 2013).

La transición hacia energías renovables se está fortaleciendo a través de una mayor integración de estas fuentes y avances tecnológicos en la transmisión, generación y distribución de energía. En particular, las líneas de transmisión eléctrica, que tradicionalmente han sido la vía principal para el transporte de electricidad a larga distancia, están pasando por una transformación notable. Investigaciones y progresos recientes han llevado a la implementación de tecnologías de vanguardia destinadas a mejorar la eficiencia, fiabilidad y sostenibilidad de la transmisión eléctrica (Consejo Mundial de la Energía, 2004).

La solicitud de energía eléctrica sigue en aumento de manera constante, especialmente en naciones que están en proceso de industrialización. A pesar de ello, la mejora de las redes eléctricas, que incluye la construcción de nuevas líneas de transmisión, no puede mantener el ritmo del crecimiento en la capacidad de las centrales eléctricas y el aumento de la demanda. Además, la edificación de nuevas líneas de transmisión implica la inmovilización de capitales que podrían ser asignados a otros proyectos (Sandoval, 2003).

Los operadores están examinando actualmente varias estrategias para mejorar la eficiencia de las líneas de transmisión actuales en respuesta a esta circunstancia particular. Se considera de suma importancia optimizar la estabilidad de las líneas extendidas tanto en escenarios temporales como permanentes. Esto se debe principalmente al hecho de que ciertas

líneas poseen límites de estabilidad relativamente bajos, lo que les impide soportar cargas que se encuentran muy cerca de su capacidad máxima (Alvarez, 2009).

Estos avances comprenden la utilización de sustancias superconductoras, la implementación de metodologías de corriente continua en lugar de corriente alterna, junto con la integración de marcos inteligentes para la observación instantánea y el comando, la observación y la administración en tiempo real (Ramírez, 2013). Este artículo explora los desarrollos más recientes en el ámbito de la transmisión de electricidad, resaltando el rol de estas tecnologías en la remodelación de la infraestructura energética y abriendo camino hacia un futuro más sostenible y resistente.

Materiales Y Métodos

El análisis del estado del arte, según Torres se define el objetivo de la revisión en este caso se aplica al estado del arte para el uso de tecnologías de transmisión de energía eléctrica. Luego se definió la ecuación de búsqueda mediante la aplicación de palabras claves las cuales se obtuvieron al analizar todos los artículos y encontrar temas en común las cuales se muestran en la tabla 1 (Torres, 2014).

Tabla 1

Palabras claves para el análisis del estado del arte

Palabras Claves		
Tecnologías	Inteligencia Artificial	Investigaciones Futuras

Después de establecer la ecuación de búsqueda, se llevó a cabo una exhaustiva investigación bibliográfica, consultando diversas bases de datos y fuentes en línea. Dada la vasta cantidad de información disponible, se optó por filtrar y seleccionar aquellos documentos publicados a partir del año 1999. Para la redacción del artículo, se eligieron 21 estudios

relevantes que abordaban información general y tecnologías relacionadas con la transmisión de energía eléctrica. Este proceso de selección se basó en una evaluación crítica de los resúmenes, priorizando aquellos que se centraban exclusivamente en tecnologías y perspectivas futuras.

Criterios de inclusión y exclusión

Para la inclusión se definió un conjunto de criterios, considerando principalmente aquellos artículos que estuvieran directamente relacionados con las tecnologías de transmisión de energía eléctrica y que abordan diversos temas de estudio para el futuro, según la evaluación de varios investigadores. Se incluyeron en la investigación análisis de tipo deductivo, experimental, mixto y de observación. Además, se propuso la incorporación de artículos redactados en español e inglés.

En el proceso de exclusión, se consideraron varios parámetros. Se descartaron los trabajos que tuvieran restricciones de acceso debido a derechos de autor. También se excluyeron todos los trabajos que estuvieran en un idioma distinto al inglés o español. Se eliminaron aquellos trabajos que no guardaran relación con el tema principal de las tecnologías de transmisión de energía eléctrica.

Análisis Genérico Comparativo

El estado actual de la investigación tiene como propósito ofrecer un análisis exhaustivo de la literatura científica asociada con la aplicación de tecnologías en la transmisión de energía eléctrica. Se abordan aspectos como diversas tecnologías, inteligencia artificial y posibles líneas de investigación futura. Aunque es difícil abarcar todas las investigaciones existentes, aquellas presentadas en la tabla 2 se consideran contribuciones significativas para obtener información clara acerca del tema. Además, estas investigaciones ofrecen orientación sobre las tendencias actuales y ayudan a definir una ruta para análisis futuros, sin descartar la posibilidad de identificar tecnologías más avanzadas que puedan surgir posteriormente.

Tabla 2

Análisis comparativo de artículos seleccionados

Datos	Año de Publicación	Autor	Tecnologías	Inteligencia Artificial	Investigaciones Futuras
	1999	Rolf [7]	X		X
	1999	Boletín [8]	X		X
	2003	De la Cruz [3]	X		X
	2004	CME [2]	X		X
	2007	Gunnar [9]	X		
	2009	Fayos [4]	X		X
	2011	Muñoz [10]			X
	2012	Velasco [5]	X		
	2013	Castellanos [11]			X
	2013	Rosario [12]	X		
	2013	Pérez [13]	X		
	2013	Monterrubio [14]	X		
	2013	Ordoñez [15]	X		X
	2014	Tejada [1]	X	X	
	2015	Oliva [16]	X		X
	2016	Caisapanta [17]	X		X
	2016	Venturo [18]	X	X	X
	2017	Celec [19]	X		X
	2019	Amalia [20]	X	X	X
	2023	Energy5 [21]	X	X	X

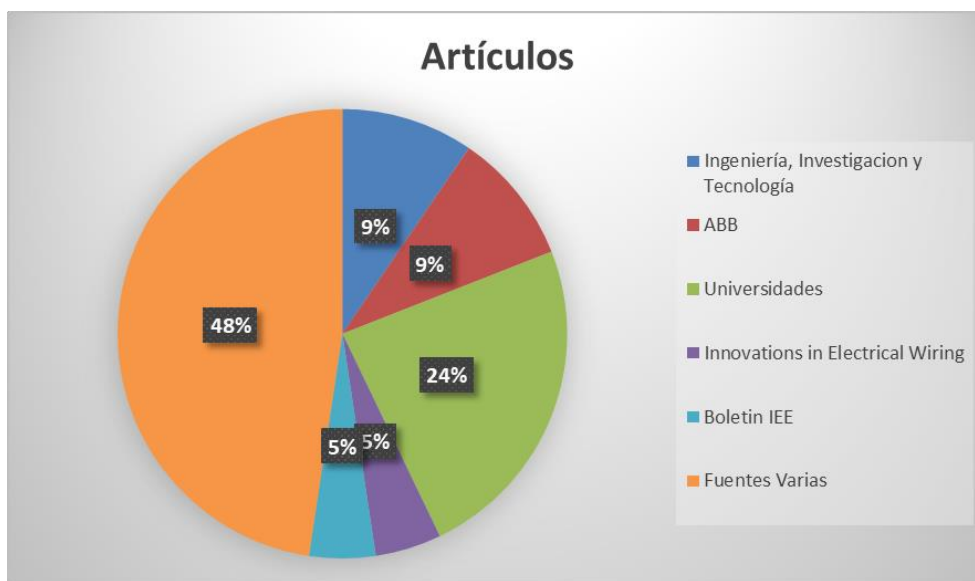
Análisis de Resultados

Tras la culminación de la adquisición de datos relacionados con el tema de investigación designado, se hace referencia a la matriz de información mediante la implementación de parámetros de inclusión y exclusión. En consecuencia, se ha elaborado una recopilación de 21 trabajos de investigación importantes. Se observa que la mayoría de los documentos seleccionados son artículos de revistas, conferencias y revisiones pertenecientes a la base de datos de la revista Ingeniería, Investigación y Tecnología que aportan un total de 2 artículos que

representa al 9% (2), de la revista ABB se obtiene 2 artículos de la misma manera representa el 9% (2). La mayoría de la información se obtuvo de bases de datos afiliadas a universidades, lo que representa el 23% (5) del total de artículos obtenidos. Concretamente, en el estudio Innovations in Electrical Wiring se publicó un artículo, lo que constituyó el 5% (1) de las conclusiones. Del mismo modo, el Boletín del IEE publicó un artículo que representaba el mismo porcentaje. Los artículos restantes, que representan el 48% (10), procedían de orígenes diversos, como se muestra en la figura 1.

Figura 1

Representación de la cantidad de artículos obtenidos de cada base de datos



Nota: Elaboración propia.

Posterior al análisis y revisión de cada artículo presentado en la tabla 2 se presentan los temas más relevantes que presentan el conjunto de estos mismos. Se pretende darles notoriedad pues son importantes para un estudio completo sobre el uso de la transmisión eléctrica.

Transmisión HDVC

Los sistemas de transmisión de corriente continua de alta tensión (HVDC) permiten la interconexión de dos sistemas de corriente alterna trifásicos a través de un enlace eléctrico de

corriente continua. Estos sistemas tienen la capacidad de operar con alta eficiencia a distancias considerables, que superan los 2000 kilómetros. Un ejemplo actual de transmisión HVDC a larga distancia conecta la región norte de Québec, Canadá, con Nueva Inglaterra, Estados Unidos, abarcando una distancia de 1.486 kilómetros (Mario, 2013).

En perspectiva, se prevé que, en el futuro, la exportación e importación internacional de electricidad a distancias significativas, superiores a 2.000 kilómetros, se llevará a cabo exclusivamente mediante tecnologías HVDC. Las líneas HVDC de larga distancia, incluyendo la transmisión submarina, presentan una ventaja distintiva en términos de estabilidad del sistema, atribuible a la elevada impedancia del cable (Ballarino, 2019).

Aunque las ventajas de la HVDC sobre la transmisión de corriente alternan (HVAC) son más evidentes en distancias mayores, ABB ha desarrollado una versión que demuestra ser económicamente viable incluso en distancias más cortas (Morales, 2016).

Diversas aplicaciones respaldan la implementación de un sistema HVDC, y estas se describen a continuación (Carranza, 2014):

- La transmisión de alta potencia a largas distancias representa una aplicación adecuada para el sistema HVDC.
 - La transmisión de alta potencia a través de cables submarinos o subterráneos también se beneficia del uso de este sistema.
 - La capacidad de gestionar de forma rápida y precisa el movimiento de la corriente eléctrica en un sistema de corriente continua de alta tensión (HVDC) permite la reducción eficiente de las oscilaciones electromecánicas, mejorando así la estabilidad de la red mediante la modulación de la potencia, particularmente en configuraciones consecutivas.
 - No hay restricciones en la frecuencia o el ángulo entre dos sistemas de corriente alterna (AC) cuando se utilizan enlaces HVDC. Estos enlaces pueden servir como conexiones entre dos
-

sistemas de corriente alterna que funcionan a frecuencias diferentes, lo que elimina la necesidad de una línea de transmisión. Esto se logra mediante el uso de configuraciones consecutivas.

- Cuando la energía se transmite desde un centro de generación distante a la carga, puede resultar ventajoso desde una perspectiva política y estratégica establecer conexiones intermedias mediante la utilización de sistemas HVDC de múltiples terminales.
- Los sistemas HVDC demuestran ser una opción viable cuando se trata de conectar instalaciones de energía renovable, particularmente aquellas situadas a una distancia considerable, como la energía eólica marina.
- Los sistemas VSC-HVDC tienen una influencia considerable en la capacidad de conectar instalaciones de energía renovable, ya que eliminan las limitaciones relacionadas con la frecuencia operativa y los requisitos previos de potencia reactiva de dichas instalaciones.
- Es posible establecer una conexión entre dos sistemas de corriente alterna (AC) sin necesidad de amplificar la potencia de cortocircuito debido a la ausencia de transmisión de potencia reactiva en los enlaces de corriente continua de alta tensión (HVDC).

Los sistemas de transmisión HVDC representan una extensión de los sistemas HVAC convencionales existentes, demostrando un rendimiento destacado en la transferencia de energía a largas distancias y la conexión de sistemas AC asíncronos. A pesar de las desventajas iniciales en costos y generación de armónicos, se vislumbra un futuro donde la tecnología HVDC jugará un papel central en la transmisión internacional de electricidad [23].

Redes de transmisión inteligente

La transición a una red inteligente requiere modificaciones sustanciales en la estrategia comercial, así como en las interacciones entre las diversas partes interesadas, como los actores de la industria, los productores, los reguladores, los proveedores de servicios de energía, los proveedores de tecnología de automatización y los consumidores. El objetivo principal de estas

redes inteligentes es mejorar la eficiencia de las conexiones entre los productores y los consumidores de energía (Ballarino, 2019).

Al analizar las modificaciones estructurales implementadas en varios países, se puede inferir que estos cambios personifican una progresión evolutiva innata con el objetivo de optimizar los recursos indispensables en la generación y suministro de energía eléctrica. En consecuencia, surge el concepto de «red de transmisión inteligente», que conceptualiza la infraestructura eléctrica de manera flexible y manejable, fusionando tanto la generación como la distribución (Alvarez, 2009).

Los obstáculos vinculados a esta perspectiva deben enfrentarse de manera efectiva, especialmente en naciones en desarrollo que buscan integrar tecnologías amigables con el medio ambiente. La superación de estos retos se respalda en la introducción de innovadoras ideas, soluciones inteligentes y avances tecnológicos (Grünbaum, 1999).

La reestructuración en el diseño y operación de los sistemas eléctricos tiene como objetivo principal obtener ventajas a través de una mayor eficiencia y competitividad en el mercado eléctrico a nivel global, tanto entre países como entre regiones. Se prevé un crecimiento dinámico en el mercado de las redes inteligentes, impulsado por el cambio climático y los programas de estímulo económico. La incorporación de volúmenes considerables de sistemas de energía renovable requerirá un ajuste en el sistema eléctrico actual, subrayando la relevancia de destacar que la infraestructura existente no está diseñada para este propósito (Ramírez, 2013).

Las redes inteligentes ofrecen diversos beneficios, entre los cuales se destacan:

Mayor Fiabilidad y Calidad en el Suministro Eléctrico:

- Incrementan la fiabilidad del suministro eléctrico al detectar y aislar averías de manera eficiente.
-

- Contribuyen a una rápida recuperación estratégica, priorizando la restauración de la electricidad en servicios críticos.

Optimización del Consumo y Gestión Activa de la Demanda:

- Empoderan a los clientes al proporcionarles instrumentos para optimizar su consumo eléctrico.
- Facilitan la gestión activa de la demanda, permitiendo a los usuarios tomar decisiones informadas sobre su uso de la energía.

Sostenibilidad Ambiental y Generación Distribuida:

- Contribuyen a la sostenibilidad ambiental al integrar la generación distribuida de fuentes renovables.
- Despliegan infraestructuras de recarga para la movilidad eléctrica, reduciendo las emisiones de CO₂ y facilitando el almacenamiento de electricidad.

Eficiencia en la Distribución y Flexibilidad en la Gestión de Demanda:

- Mejoran la eficacia en la distribución de flujos de energía.
- Aumentan la flexibilidad en la gestión de picos de demanda, disminuyendo la necesidad de nuevas instalaciones de generación.

Las redes inteligentes no solo incrementan la fiabilidad y eficacia en la entrega de energía, sino que también capacitan a los usuarios para tomar decisiones informadas sobre su consumo eléctrico. Asimismo, promueven la sostenibilidad ambiental al integrar fuentes renovables y contribuir a la disminución de las emisiones de CO₂ (Alava, 2016).

Sistemas flexibles de transmisión de CA (FACTS)

El término "FACTS" engloba la totalidad de sistemas basados en electrónica de alta potencia utilizados para la transmisión de energía en corriente alterna. Los sistemas principales incluyen (Mario, 2013):

- Compensador estático (SVC).
-

- Condensador en serie, fijo y controlado por tiristores (TCSC).
- Transformador de desplazamiento de fase (PST) y PST asistido (APST).
- Compensador estático síncrono (STATCOM).
- Compensador en serie estático síncrono (SSSC).
- Controlador unificado de flujo de energía (UPFC).

Los sistemas eléctricos, el término FACTS engloba diversas tecnologías diseñadas para potenciar la seguridad, capacidad y eficiencia de las actuales redes de transporte de electricidad. Este enfoque busca mantener o incluso mejorar los márgenes operativos necesarios para asegurar la estabilidad de la red. Como resultado, se logra una mayor entrega de energía a los consumidores con un impacto ambiental mínimo, tiempos de implementación sustancialmente más cortos e inversiones más moderadas, en comparación con la alternativa de construir nuevas líneas de transmisión o plantas generadoras (Morales, 2016).

Las dos razones primordiales que respaldan la incorporación de dispositivos FACTS en los sistemas eléctricos son el aumento de los límites de estabilidad dinámica y la optimización del control del flujo de energía. En un contexto donde la optimización del desempeño de las redes eléctricas se vuelve cada vez más esencial, tanto por razones económicas como medioambientales, los dispositivos FACTS se presentan como la solución más establecida en el mercado para mejorar la eficiencia en la utilización de las líneas de transmisión (Pérez, 2013).

La tecnología HVDC-VSC

La tecnología HVDC-VSC actualmente se presenta como la opción más prometedora para superar a sus predecesoras en diversos campos. Esto explica por qué varias empresas están optando cada vez más por esta solución, y aquellas que fabrican los equipos están proporcionando componentes mejorados para una gama variada de tensiones y potencias, ejemplificado por casos como el de ABB con su tecnología HVDC-Light (Alava, 2016).

Siemens está promoviendo HVDC PLUS (Power Link Universal System), y de manera más reciente, ALSTOM ha introducido HVDC MaxSine. Las compañías especializadas en la construcción de redes eléctricas, como los operadores del sistema en diferentes países, están adoptando de manera creciente esta solución debido a sus ventajas económicas, técnicas y/o medioambientales. Dentro de este contexto, la tecnología VSC podría agilizar la incorporación de la corriente continua en las conocidas 'redes inteligentes' (Smart Grids) o incluso en el establecimiento de "superredes" de generación completamente renovable (Rosario, 2013).

La complejidad intrínseca de los sistemas HVDC se manifiesta en la variedad de modelos, simulaciones y controles propuestos a lo largo del tiempo para resolver distintos problemas en sistemas interconectados AC/DC. El objetivo principal es hacer factibles técnicamente estos enlaces, para lo cual se requiere un modelo de análisis específico para sistemas de transmisión AC interconectados con enlaces HVDC. Los modelos más comunes de convertidores HVDC son de tipo fuente de corriente (LCC) y fuente de voltaje (VSC), y se integran en redes mixtas AC/DC para analizar flujos de potencia y estabilidad. En la actualidad, los enlaces con convertidores VSC son los más avanzados, ya que pueden suministrar potencia reactiva sin la necesidad de un banco de capacitores en condiciones normales o de falla (Arango, 2014).

La diversidad y complejidad de modelos, controles y métodos de simulación en sistemas mixtos AC/DC motivan este trabajo como una guía que facilita la revisión del estado actual de esta tecnología. Aunque la tecnología HVDC ofrece beneficios notables, como la eficiente transmisión de grandes cantidades de potencia a largas distancias y la integración de energía renovable en redes AC, los desafíos asociados a la estabilidad de la red AC/DC mixta, especialmente en relación con los componentes electrónicos de estos enlaces, son abordados en esta investigación, proporcionando una herramienta efectiva para comprender las soluciones propuestas en diversas investigaciones actuales (Rosero, 2020).

Red de transmisión PERT

El Problema de Planeamiento de la Expansión de la Red de Transmisión (PERT) es un desafío clásico en los sistemas de energía eléctrica. Su objetivo principal es determinar el plan óptimo de expansión de líneas y/o transformadores que deben ser incorporados a la red para asegurar una operación viable dentro de un horizonte de tiempo específico y a un costo mínimo. Este plan debe especificar la ubicación, la cantidad y el momento en que se deben instalar los nuevos elementos de la red, como líneas y transformadores. Los datos necesarios para abordar este problema incluyen la topología actual de la red, los circuitos candidatos, la capacidad de generación, la demanda proyectada para el horizonte de tiempo definido y restricciones de inversión, entre otros (Morales, 2016).

Es esencial resaltar que una falta de planificación a largo plazo puede resultar en un sistema futuro ineficaz con altos costos operativos, afectando el desarrollo de la expansión de la generación y el mercado de electricidad. Esto se debe a que estos elementos dependen en gran medida de la topología y la capacidad de la red de transmisión, determinando así la posibilidad de una competencia equitativa entre los proveedores y consumidores de energía (Asplund, 2007).

La principal consecuencia de una planificación inadecuada es la necesidad de operar un sistema ineficiente durante períodos prolongados, ya que una vez que se ha realizado una inversión y puesto en funcionamiento, resulta difícil reconstruir o trasladar una línea de transmisión (o subestación) de alta tensión (Alzate, 2020).

Nanotubos de carbono en transmisión de energía

El cableado de nanotubos de carbono podría llevar a una transmisión de energía eléctrica más eficiente a lo largo de distancias extensas, disminuyendo las pérdidas de energía observadas en los cables de cobre convencionales. Este desarrollo tiene el potencial de mejorar

notablemente la sostenibilidad y la asequibilidad de las redes de distribución de energía (Alzate, 2020).

El cableado de nanotubos de carbono presenta varias ventajas sobre el cableado de cobre convencional, lo que lo convierte en una opción convincente para futuras aplicaciones. Vamos a explorar algunos de los beneficios clave (Hernando, 2016):

Conductividad superior. Los nanotubos de carbono son conocidos por su impresionante conductividad eléctrica. Las investigaciones han demostrado que pueden transportar mil veces más corriente eléctrica que los cables de cobre del mismo diámetro. Esta ventaja de conductividad puede llevar a una transmisión de electricidad más eficiente, minimizando la pérdida de energía en el camino.

Ligero y flexible. Los cables de nanotubos de carbono son increíblemente livianos y flexibles, lo que los hace más fáciles de instalar y maniobrar dentro de estructuras complejas. Su naturaleza liviana también reduce el peso total de los sistemas eléctricos, lo cual es particularmente beneficioso en aplicaciones como la aeroespacial y los vehículos eléctricos.

Resistencia a la corrosión y al envejecimiento. A diferencia del cobre, los nanotubos de carbono son muy resistentes a la corrosión, la oxidación y el envejecimiento. Esta propiedad asegura la longevidad y confiabilidad de los sistemas de cableado eléctrico, reduciendo los costos de mantenimiento asociados con los reemplazos periódicos.

Gestión térmica. Una ventaja adicional de los nanotubos de carbono radica en su destacada capacidad de conducción térmica. Esta característica los convierte en eficientes para disipar el calor, aspecto crucial para los dispositivos electrónicos. La gestión eficaz del calor por parte del cableado de nanotubos de carbono puede contribuir a mejorar el rendimiento y extender la vida útil de los componentes electrónicos.

Según un informe elaborado por investigadores de la Universidad de Toronto, Canadá, se identifican catorce aplicaciones altamente prometedoras en el ámbito de la nanotecnología.

Estas áreas comprenden desde el almacenamiento, producción y conversión de energía hasta aplicaciones en armamento y sistemas de defensa, producción agrícola, tratamiento y remediación de aguas, diagnóstico y cribado de enfermedades, sistemas de administración de fármacos, procesamiento de alimentos, remediación de la contaminación atmosférica, construcción, monitoreo de la salud, detección y control de plagas, control de desnutrición en áreas empobrecidas, informática y alimentos transgénicos (Hernando, 2016).

Dentro del ámbito de las tecnologías limpias, especialmente en la implementación del hidrógeno como combustible, considerado un sustituto ideal de los combustibles fósiles, surgen desafíos relacionados con su almacenamiento. La inseguridad y los altos costos asociados con la compresión o licuación del hidrógeno limitan su aplicabilidad práctica. Se ha evidenciado que los procesos de adsorción son los más prometedores para el almacenamiento de hidrógeno, destacándose por su seguridad y eficiencia. En este sentido, se están desarrollando diversos materiales, siendo los nanotubos de carbono identificados como altamente eficaces en la capacidad de almacenamiento de hidrógeno (Maubert, 2009).

Sistemas de transmisión con superconductores

La razón detrás de la implementación de un cable superconductor es sustituir el conductor metálico por uno superconductor capaz de transportar corrientes más elevadas con pérdidas mínimas (cero pérdidas óhmicas en el caso de corriente continua). La desventaja radica en la necesidad de mantener el superconductor a bajas temperaturas, lo cual implica un conducto para el flujo de criógeno, además de una capa aislante. Afortunadamente, el conductor tiene la capacidad de soportar una densidad de corriente muy alta, lo que implica que se necesita poco material para el conductor (Arango, 2014).

Esto abre la posibilidad para la inclusión del conducto de criógeno y la capa aislante, lo que facilita que un cable superconductor tenga dimensiones similares o incluso más reducidas que un cable convencional. Esta circunstancia es fundamental, ya que más del 50% de los gastos

asociados a las instalaciones subterráneas tradicionales se destinan a la excavación de la zanja para alojar el sistema (Morales, 2016).

Las aplicaciones de los superconductores tienen aplicaciones significativas, como la creación de imanes superconductores que superan en potencia a los electroimanes estándar. Estos imanes son empleados en resonancias magnéticas (IRM), creando imágenes de alta resolución del interior del cuerpo sin exponer a los pacientes a radiaciones perjudiciales (Oliva, 2015).

Otra aplicación destacada es el uso del dispositivo SQUID (superconducting quantum interference device), un magnetómetro altamente sensible utilizado para medir campos magnéticos extremadamente débiles. El SQUID se basa en bucles superconductores con uniones de Josephson, un fenómeno predicho por B. D. Josephson en 1962, conocido como el efecto Josephson. Este dispositivo consiste en un bucle superconductor que incorpora dos uniones Josephson, y cuando se expone a un campo magnético, experimenta un fenómeno de interferencia que está directamente relacionado con la intensidad del campo magnético (Moebs, 2021).

Tecnología AMI (Infraestructura de medición avanzada)

La medición desempeña una función esencial en los sistemas de energía eléctrica, posibilitando que las compañías proveedoras de servicios cuantifiquen la generación, transmisión, distribución y facturación de energía. El método tradicional de medición, que es periódico y acumula valores mensuales o bimestrales, solo proporciona información sobre la cantidad total de energía consumida, sin detalles sobre el patrón de consumo ni los niveles de carga en tiempo real, especialmente para usuarios de baja tensión. Esto limita el control de los consumos y la capacidad de reacción inmediata ante eventos que afectan la red (Díaz, 2014).

La carencia de datos específicos acerca de los flujos energéticos en los puntos de la red de distribución y en las demandas de los usuarios impacta a las compañías eléctricas de manera

significativa como a los usuarios, quienes carecen de herramientas efectivas para abordar los desafíos asociados al control eficiente de la red, ya sea en condiciones normales de operación o frente a perturbaciones. Además, las empresas eléctricas enfrentan dificultades para cuantificar de manera eficiente las pérdidas, ya sean de origen técnico o no técnico. En este entorno particular, la introducción de la infraestructura de medición avanzada (AMI) se describe como una solución viable para superar estas limitaciones y mejorar la administración y la eficacia del sistema eléctrico (Maubert, 2009).

La tecnología AMI desempeña un papel esencial en la mitigación de las pérdidas en las redes eléctricas inteligentes, con un enfoque principal en el consumo y la demanda de energía en el ámbito de las compañías eléctricas y los consumidores. La integración de tecnologías de medición de vanguardia permite describir con claridad los lugares precisos en los que se utiliza la energía en actividades relacionadas con el transporte, la distribución y la comercialización de energía eléctrica a través de las redes eléctricas (López, 2015).

Transmisión inalámbrica de energía

La implementación de la transmisión inalámbrica de energía ha mejorado en gran medida el progreso de los desarrollos científicos y tecnológicos. La transferencia de energía sin cables, basada en la resonancia de acoplamiento magnético (MCR-WPT), presenta amplias perspectivas de aplicación, siendo útil en productos populares como dispositivos médicos implantables y productos electrónicos, con impactos sociales positivos. En la actualidad, nuestra investigación en MCE-WPT está en una fase inicial, y es necesario profundizar en la investigación, abordar problemas y lograr que la tecnología alcance la madurez, permitiendo su aplicación generalizada tanto en la investigación científica como en productos comerciales (Moebs, 2021).

La insuficiencia de datos completos sobre el movimiento de la energía dentro de los nodos de la red de distribución y los patrones de consumo de los usuarios tiene un impacto significativo

tanto en las compañías eléctricas como en los propios usuarios, ya que carecen de medios eficaces para abordar estos problemas (Morales, 2016).

En cuanto a sus características:

Ventaja: Ofrece la capacidad de realizar una transmisión de alta potencia, con eficiencia a larga distancia y utilizando una frecuencia de operación baja.

Desventaja: La distancia de transmisión es limitada, generalmente a un nivel de aproximadamente un centímetro. Se requiere una posición receptora precisa, y la presencia de cuerpos extraños puede generar calentamiento localizado. Además, es susceptible a interferencias electromagnéticas.

Aplicación: Este método encuentra aplicación en pequeños dispositivos electrónicos, carga inalámbrica de vehículos eléctricos, suministro de energía en pistas de tráfico, entre otras aplicaciones (Wang, 2018).

Tabla comparativa de las tecnologías

A continuación, se presenta en la tabla 3 un comparativo de las tecnologías de transmisión de energía mencionadas, destacando sus ventajas y desventajas:

Tabla 3

Cuadro comparativo de las tecnologías

Tecnología de Transmisión	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones
HVDC	Eficiencia a largas distancias (superior a 2,000 km).	Costos iniciales y generación de armónicos.	Transmisión de alta potencia a largas distancias. Transmisión submarina. Control preciso del flujo y estabilidad del sistema. Conexiones entre sistemas AC asincrónicos.

Tecnología de Transmisión	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones
Redes Inteligentes	Mayor fiabilidad y calidad en el suministro eléctrico.	Requiere cambios significativos en el enfoque comercial y en las relaciones entre la industria, reguladores y consumidores.	Enlace de plantas de energía renovable. Optimización del consumo y gestión activa de la demanda. Integración de generación distribuida. Sostenibilidad ambiental. Eficiencia en la distribución. Flexibilidad en la gestión de la demanda.
FACTS	Mejora la seguridad, capacidad y eficiencia de las redes de transporte de electricidad.	-Requiere inversiones moderadas, pero aún considerables.	Elevación de los límites de estabilidad dinámica. Mejora del control del flujo de energía. Mayor entrega de energía con impacto ambiental mínimo.
Tecnología HVDC-VSC	Prometedora para superar a su predecesora en varios ámbitos.	Complejidad intrínseca de los sistemas HVDC.	Implementación en redes inteligentes y "superredes" de generación renovable.
Nanotubos de Carbono	Conductividad eléctrica superior y eficiente transmisión de electricidad.	Requiere investigación adicional y desarrollo tecnológico.	Transmisión de energía eléctrica eficiente a largas distancias. Aplicaciones en aeroespacial y vehículos eléctricos.
Sistemas con Superconductores	Transporte de corrientes elevadas con pérdidas mínimas.	Necesidad de mantener el superconductor a bajas temperaturas.	Imágenes de resonancias magnéticas. Sistemas SQUID para medición de campos magnéticos.

Tecnología de Transmisión	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones
Tecnología AMI	Proporciona información detallada en tiempo real sobre el consumo de energía.	Requiere inversión en infraestructura avanzada de medición.	Reducción de pérdidas en redes eléctricas inteligentes. Mejora en la gestión y eficiencia del sistema eléctrico.
Transmisión Inalámbrica	Capacidad de transmisión de alta potencia a larga distancia con eficiencia.	Distancia de transmisión limitada y necesidad de posición receptora precisa.	Carga inalámbrica de dispositivos electrónicos. Suministro de energía en pistas de tráfico. Aplicaciones en pequeños dispositivos electrónicos.

La selección de la tecnología de transmisión se basa en varios elementos, incluida la distancia de transmisión, la capacidad de carga, los gastos asociados y las aplicaciones específicas.

Conclusiones

La transmisión de corriente continua de alta tensión (HVDC) se distingue notablemente por su capacidad para conectar sistemas de corriente alterna a grandes distancias, superando el umbral de los 2.000 kilómetros. Su eficiencia en la transmisión se evidencia en la conexión que abarca 1,486 kilómetros entre el norte de Quebec y Nueva Inglaterra. Se proyecta que, en el futuro, la exportación e importación internacional de electricidad se realizará exclusivamente mediante tecnologías HVDC, especialmente para distancias considerables. La versión económica de HVDC desarrollada por ABB amplía su viabilidad incluso en distancias más cortas.

La transición hacia redes inteligentes implica cambios profundos en el paradigma comercial y las relaciones entre diversos actores de la industria eléctrica. Las transformaciones estructurales implementadas en diversas naciones señalan una transición orgánica hacia una

infraestructura eléctrica que logra una integración flexible de la generación y distribución. La adecuación a considerables cantidades de energía renovable implica abordar de manera eficaz desafíos, especialmente en países en desarrollo, apoyándose en nuevas ideas, soluciones ingeniosas e innovaciones tecnológicas.

La tecnología HVDC-VSC emerge como la opción más prometedora para el futuro, superando a su predecesora en diversas áreas. Empresas líderes, como ABB, Siemens y ALSTOM, están adoptando esta solución debido a sus beneficios económicos, técnicos y medioambientales. La tecnología VSC posee la capacidad de mejorar la transmisión de energía y, al mismo tiempo, facilitar la integración de la corriente continua en redes inteligentes o el establecimiento de superredes con el fin de lograr una generación integral de energía renovable.

Las innovaciones en la transmisión de energía incluyen el uso de nanotubos de carbono, prometiendo una transmisión más eficiente a largas distancias. Estos nanotubos ofrecen ventajas significativas, como una conductividad eléctrica superior, ligereza y flexibilidad, resistencia a la corrosión y al envejecimiento, así como una gestión térmica eficiente. Además, la exploración de sistemas de transmisión con superconductores busca superar desafíos mediante la capacidad de transportar corrientes elevadas con pérdidas mínimas, a pesar de la necesidad de mantener temperaturas extremadamente bajas. La innovación en materiales y tecnologías sugiere un camino hacia sistemas de transmisión más eficientes y sostenibles en el futuro.

Referencias bibliográfica

- Alava, L. A. (2016). Aplicación De Las Redes Inteligentes Para El Aumento De La Eficiencia Energética En Las Redes Eléctricas. *RIEMAT*, 1(7), 1-5.
- Alvarez, A. F. (2009). Líneas Eléctricas Y Transporte De Energía Eléctrica. *UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA*, 2-71.
- Alzate, P. P. (2020). Planeamiento de la expansión de redes de transmisión a largo plazo usando una formulación basada en ciclos. *Línea de Planeamiento en Sistemas Eléctricos de Potencia*, 2-98.
- Arango, D. T. (2014). Planeamiento De La Expansión De La Red De Transmisión En Sistemas Eléctricos De Potencia Considerando. *La Serena*, 25(1), 1-11.
- Asplund, G. (2007). Transmisión de ultra alta tensión. *Revista ABB*, 1-6.
- Ballarino, A. (2019). Transmisión eficiente y de alta capacidad a gran distancia. *norvento enerxia*, 1-4.
- Carranza, M. G. (2014). Incorporación de Dispositivos FACTS y Transmisión HVDC en el Cálculo de Flujos de Potencia. *EPN*, 1-12.
- Casanova, E. G. (2013). Estudio experimental y teórico de nanotubos de carbono depocas paredes. *CIMAV*, 3-108.
- CELEC. (2017). Instructivo para selección de ruta para líneas de transmisión . *CELEC*, 1-35.
- Consejo Mundial de la Energía. (2004). Tecnologías de uso final de la energía para el siglo XXI . *Energy End-Use Technologies for the 21st Century* , 1-129.
- Diaz, R. (2014). Brief Description Of High Voltage Direct Current Transmission Systems. *Autonomous University of the West*, 2-7.
- Energy, F. (2023). El papel de los nanotubos de carbono en las soluciones revolucionarias de cableado eléctrico. *Innovations in Electrical Wiring*, 1-19.
- Grünbaum, R. (1999). FACTS, poderosos sistemas para una transmisión flexible de la energía. *ABB Power Systems AB*, 5, 1-14.
- Hernando, C. T. (2016). Expansión De Sistemas De Transmisión Eléctrica Usando Criterios De Óptima Potencia Ac. *UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA*, 5-19.
- lee, B. (1999). Efecto de la tecnología en transmisión, distribución y en los usos finales de energía. *Boletín IEE*, 136, 64-67.
- López, J. M. (2015). Aplicación de tecnologías de medición avanzada (AMI) como instrumento para reducción de pérdidas. *Boletín IIE*, 180-191.
- Mario, M. D. (2013). Transporte De Energía Eléctrica En Corriente Continua. Enlaces Hvdc-Vsc. *INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL, ESPECIALIDAD ELECTRICIDAD* , 2-139.
- Maubert, M. (2009). Nanotubos De Carbono – La Era De La Nanotecnología. *Razón y Palabra*(68), 2-11.
- Moebs, W. (2021). Física universitaria volumen 2. *openstax*, 2.
- Morales, M. V. (2016). El Principio De Libre Acceso A Redes De Transmisión Eléctrica: Análisis, Problemática Y Propuestas De Mejora. *Universidad del Pacífico*, 1-93.
- Muñoz, J. (2011). Las líneas de transmisión en base a superconductores. *REGIÓN CAPAPITAL*, 1-50.
- Oliva, S. V. (2015). Tecnologías emergentes para la transición energética en España. *Ei*, 420, 125-135.

- Pérez, F. (2013). Sistemas de transmisión flexible en corriente alterna. *PRISMA tecnológico*, 4(1), 25-28.
- Rafael, C. B. (2014). Determinación de límites de transmisión en sistemas. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XV(2), 271-286.
- Ramírez, V. (2013). Redes de transmisión inteligente. Beneficios y riesgos. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, volumen XIV (número1), 81-88.
- Rosario, F. R. (2013). Transmisión de Energía con Corriente Continua en Alta Tensión. *Universidad Tecnológica Nacional*, 1-83.
- Rosero, R. (2020). Una Revisión Acerca de Tecnologías y Modelación de Enlaces HVDC para Estudios Eléctricos. *DEVELOPMENT IN ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES*, 2(1), 19.
- Sandoval, R. d. (2003). La Problemática de la Actividad de Transmisión de Energía en el Perú:. *Consorcio de Investigación Económica y Social - Proyectos Breves*, 1-63.
- Torres, A. (2014). Criterios para publicar artículos de revisión sistemática. *Rev Esp Méd Quir*, 19, 393-399.
- Wang, Y. (2018). A view of research on wireless power transmission. *Phys*, 2-8.
-