



## Análisis de las aplicaciones y consideraciones futuras de la transmisión de energía eléctrica HVDC: caso Ecuador

### Analysis of HVDC power transmission applications and future considerations: the case of Ecuador

#### Autores

Jefferson Rafael Centeno Alcívar <sup>1\*</sup>

<https://orcid.org/0000-0001-6039-9517>

Edison Ramiro Tipán Endara <sup>2</sup>

<https://orcid.org/0009-0005-3794-5264>

<sup>1</sup> Facultad de Ingenierías. Universidad Técnica Luis Vargas Torres. Esmeralda, Ecuador.

<sup>2</sup> Wartsila. Tababela, Ecuador.

\* Autor para correspondencia.

[jefferson.centeno@utelvt.edu.ec](mailto:jefferson.centeno@utelvt.edu.ec)

**Citacion sugerida:** Centeno Alcívar, J. & Tipán Endara, E. (2024). Análisis de las aplicaciones y consideraciones futuras de la transmisión de energía eléctrica HVDC: caso Ecuador. *Revista de investigaciones en energía, medio ambiente y tecnología. RIEMAT*, 9(2), pp. 48-57. <https://doi.org/10.33936/riemat.v9i2.6956>

Recibido: 30/08/2024

Aceptado: 15/09/2024

Publicado: 12/12/2024

#### Resumen

El presente artículo aborda de forma clara un análisis de las aplicaciones y las consideraciones futuras de la transmisión de energía eléctrica en corriente continua (HVDC) en el Ecuador, y en el contexto global, gracias a que esta tecnología trae consigo algunas ventajas técnicas y económicas que benefician a la empresa operadora en el transporte de electricidad, y al sistema eléctrico como tal. Por este motivo, se realizó una profunda revisión del estado del arte de carácter empírico, teórico, y analítico sobre la situación actual del sistema eléctrico ecuatoriano, las ventajas y desventajas de los sistemas HVDC frente a los de alto voltaje en corriente alterna (HVAC), los desafíos técnicos, las consideraciones futuras en el contexto de Ecuador, y las innovaciones tecnológicas que presenta la transmisión de energía eléctrica en corriente continua en todo el mundo. La metodología empleada responde a los objetivos planteados mediante un análisis sistemático, aclarando la viabilidad, y las aplicaciones del HVDC en Ecuador, por lo tanto, se determinó que no existe una red de transmisión de este tipo, ni proyectos planificados. Sin embargo, se destaca la viabilidad que tiene esta tecnología al combinarse con la matriz energética renovable, la conexión con otros sistemas a diferentes frecuencias de operación, y como soporte a la estabilidad del sistema eléctrico mediante el almacenamiento de energía en baterías, siendo el HVDC una tecnología con muchas aplicaciones a futuro en Ecuador.

**Palabras clave:** Corriente continua; integración renovable; SNI; transmisión eléctrica.

#### Abstract

This article clearly addresses an analysis of the applications and future considerations of direct current power transmission (HVDC) in Ecuador, and in the global context, thanks to the fact that this technology brings with it some technical and economic advantages that benefit the operating company in the transmission of electricity, and the electrical system as such, that is why, For this reason, an in-depth review of the state of the art of empirical, theoretical and analytical character was carried out on the current situation of the Ecuadorian electrical system, the advantages and disadvantages of HVDC systems versus high voltage alternating current (HVAC), the technical challenges, future considerations in the context of Ecuador, and the technological innovations in the transmission of direct current electricity worldwide. The methodology used responds to the objectives set through a systematic analysis, clarifying the feasibility and applications of HVDC in Ecuador, therefore, it was determined that there is no transmission network of this type, nor planned projects, however, it highlights the viability of this technology when combined with the renewable energy matrix, the connection with other systems at different operating frequencies, and as support for the stability of the electrical system through energy storage in batteries, being HVDC a technology with many future applications in Ecuador.

**Keywords:** Direct current; renewable integration; SNI; electricity transmission.



## 1. Introducción

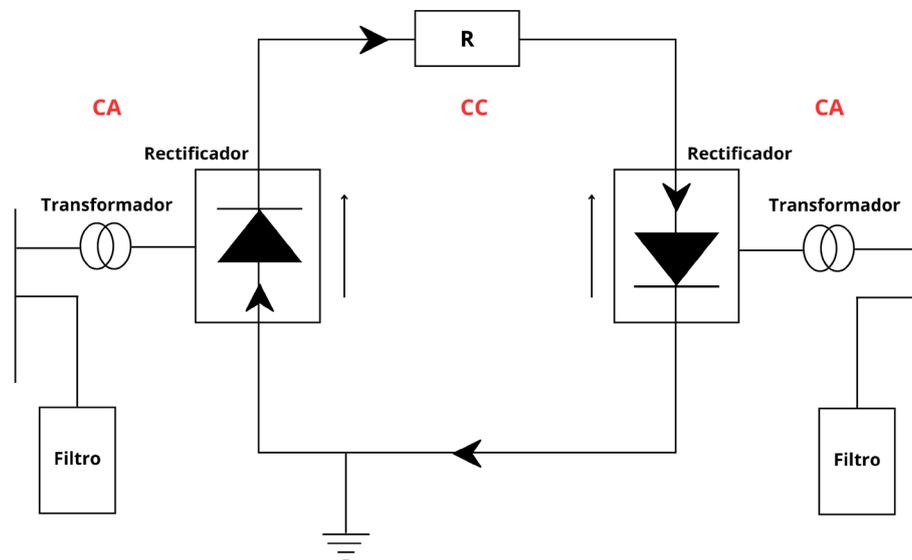
La los puntos de distribución y consumo, mediante líneas de transmisión de alto voltaje en corriente alterna (AC) y en corriente directa (DC), en este contexto, los sistemas de alto voltaje en corriente directa, comenzaron a tener más titularidad a inicio del año 1903, a partir de que los dispositivos electrónicos empezaron a mostrar perspectivas reales para el alto voltaje en la transmisión de corriente directa, debido a la capacidad de estos dispositivos para la rectificación y la conversión de energía (López, 2017).

La contribución más significativa del HVDC se produjo en 1954, cuando el régimen de Gotland en Suecia ejecutó el primer sistema comercial de transmisión HVDC en el mundo. Este era capaz de transportar 20 megavatio (MW) de potencia a un voltaje de 100 kilovoltio (kV), esto dio hincapié al desarrollo de nuevos convertidores electrónicos de mayor capacidad, para el transporte de energía eléctrica a mayores niveles de voltajes y potencia, por otro lado, en las últimas tres décadas, la transmisión de energía de alto voltaje en corriente directa se ha convertido en un complemento importante en todo sistema eléctrico de transmisión de corriente alterna (López, 2017).

En un contexto general, los sistemas HVDC están compuestos de estaciones convertidoras, transformadores, las diferentes configuraciones para el transporte de energía según la potencia, los sistemas de control, y los sistemas de protección (Alassi, et al. 2019). Sin embargo, en la Figura 1, se muestra un esquema de transmisión en configuración AC-DC-AC, que expone las partes principales de la conexión con sistemas de corriente alterna y la transmisión en corriente directa (García, 2020; Landi y Macancela, 2023).

**Figura 1**

*Esquema de un sistema en configuración AC-DC-AC.*



*Fuente: (García, 2020)*

En complemento con lo anterior, los sistemas HVDC y HVAC tienen algunas características que no se pueden evaluar fácilmente durante su implementación, por lo que en la Tabla 1, se proporciona una comparación basada en la planificación de estrategias operativas en cada tecnología, que pueden conducir a la reducción significativa del costo total (Han y Gole, 2020).

**Tabla 1**

*Comparación de las características del HVDC y HVAC basadas en la planificación de estrategias operativas.*

HVDC	HVAC
Diseño de estaciones de transformación de corriente directa, y líneas para la economía de carga, y mínimos efectos del campo eléctrico, además, de una mayor transmisión de energía en un solo sentido.	El uso de sistemas de control estáticos VAR, para alcanzar la máxima economía y proporcionar control del voltaje de alta velocidad, para la mejora de la estabilidad en la transmisión de corriente alterna.
Desarrollo incremental o por etapas de los sistemas de corriente directa según lo determinado por el crecimiento de la carga.	El uso de capacitores en serie para reducir la impedancia del sistema de transmisión.
Permite la modulación de los flujos de corriente directa para proporcionar una mayor estabilidad dinámica de las cargas en las líneas de corriente alterna, proporcionando asistencia rápida entre los sistemas.	El uso de capacitores serie de alta velocidad de inserción para la mejora de la estabilidad.
Combina la modulación de corriente continua y la absorción de reactivos para optimizar la asistencia de corriente alterna, y la eficiencia de corriente directa.	Efectúa un ajuste en la impedancia de transmisión y combina la modulación de los flujos de corriente alterna para permitir una mayor estabilidad dinámica de cargas.

*Fuente: (Han y Gole, 2020)*

En un contexto local, el déficit energético que atraviesa el país y el aumento de la demanda, que siempre tiende a crecer con el pasar de los años, obliga a las empresas estratégicas del sector energético a producir más energía eléctrica, o buscar otras soluciones como la interconexión de sistemas eléctricos con países como Colombia a 525 MW y Perú a 110 MW, además, de la puesta en marcha de centrales de origen renovables terrestres, solar y marinas para satisfacer la demanda energética local (MERNNR, 2018; Guamán, 2019).

En posición al uso del HVDC, este se encuentra presente en dichas soluciones, gracias a su adaptabilidad asíncrona entre sistemas o tramos en el transporte de energía, utilizando convertidores “back-to-back”. Es decir, AC-DC-AC, o efectuar la configuración DC-DC-AC para la conexión de centrales renovables al sistema nacional interconectado (S.N.I), o a su vez, la integración de sistemas de almacenamiento de energía en baterías para la regulación primaria en frecuencia, voltaje e inyección de potencia, no obstante, para considerar la implementación de esta tecnología primero se deben evaluar los costos, y las especificaciones técnicas según la necesidad, además, se debe considerar la oportunidad de efectuar simulaciones de flujo de potencia, para conocer los beneficios y deficiencias que el HVDC puede ofrecerle al sistema eléctrico en cada caso (Rodríguez, 2011; Trintis et al., 2011).

Por lo tanto, este estudio busca hallar las aplicaciones y consideraciones futuras que se les puede dar a la transmisión de energía eléctrica en corriente directa, de manera general, y específicamente en Ecuador, desde una perspectiva técnica mediante una revisión literaria de los proyectos existentes, planificados, las oportunidades con las energías renovables, la comparación y complemento del HVDC y HVAC, junto a la innovación tecnológica que la propicia.

## 2. Métodos y Materiales

La presente investigación conlleva una estructura metodológica de revisión sistemática, que responde de forma clara a las principales interrogantes que presenta el HVDC, y, a su vez, busca describir la situación actual y las consideraciones futuras al transportar energía eléctrica en Ecuador. Por lo tanto, para el desarrollo del presente artículo, primero se realizó una revisión del estado del arte de carácter empírico, teórico y



analítico, el cual se basó en la búsqueda de información relevante y actualizada, sobre la transmisión de energía eléctrica HVDC, así como sus aplicaciones, ventajas, desventajas y algunos casos de estudios prácticos - teóricos efectuados en el contexto local y global, para darle una visión clara a esta forma de transportar la energía eléctrica.

IEEE Xplore y Google Scholar, utilizando combinaciones de palabras clave “HVDC Ecuador”, “HVDC System”, “Integración Renovable”, “Transmisión eléctrica en corriente continua”, entre otras. Se seleccionaron artículos científicos, tesis y fichas técnicas que abordaran aspectos relacionados con casos prácticos de implementación, modos de operación, y técnicas de control para trabajar junto a sistemas HVAC. Además, se aplicaron criterios de inclusión y exclusión para seleccionar los documentos con la información requerida de calidad, en el idioma inglés y español.

En segundo lugar, una vez seleccionados los documentos, se realizó una lectura crítica, extrayendo lo más esencial de cada estudio, relacionado a los avances tecnológicos y aplicaciones relevantes, como por ejemplo, la importancia de las innovaciones como el desarrollo de convertidores de fuente de voltaje (VSC) por ABB, el cual, ha sido crucial en la transmisión eficiente de energía a largas distancias, y a su vez se analizaron casos exitosos como el proyecto NordLink, en Europa, que ha demostrado la efectividad del HVD en la integración de redes eléctricas a través de largas distancias. Por tanto, estos aspectos fueron sintetizados y analizados con la finalidad de asentar resultados sólidos que reflejen el uso de la tecnología HVDC, de la forma más integral, y considerarla en futuros proyectos en Ecuador.

Y, por último, se redactó el artículo de revisión, siguiendo una estructura lógica y coherente que incluyó: una introducción que presentó el contexto y los objetivos del estudio, una sección de resultados y discusión donde se organizaron y analizaron los hallazgos clave de la literatura, incluyendo la situación de la transmisión eléctrica ecuatoriana, los avances tecnológicos, y las aplicaciones relevantes del HVDC, para finalmente incluir conclusiones que resaltaron la importancia de esta tecnología para futuros proyectos en Ecuador, acompañadas de recomendaciones en futuras investigaciones que podrían mejorar la implementación de esta tecnología en el país.

### 3. Resultados y Discusión

#### 3.1. Situación actual de la Transmisión de energía eléctrica en Ecuador

La transmisión de energía eléctrica en Ecuador opera a 60 Hertz (Hz) AC a tres niveles de voltaje. Primero están las líneas de 500 kV con una longitud de 610 km, segundo están las líneas de 230 kV, con una longitud de 3249 km y, por último, se encuentran las líneas de 138 kV con una longitud de 2408.82 km. Por este motivo, el sistema eléctrico de transmisión cuenta con un total de 6267.99 km (MERNNR, 2018).

Resulta evidente que no existe transmisión de energía eléctrica en corriente continua, pero si existiera una red de éste tipo en Ecuador, se podría optimizar el transporte de energía en lugares remotos de difícil acceso, siendo de esta forma el HVDC una tecnología altamente eficiente para transmitir grandes cantidades de electricidad a largas distancias, integrar energías renovables, e interconectar regiones a distintas operatividad de red, abriendo el camino a nuevas soluciones de transmisión eléctrica sostenible, por lo tanto, en esta sección se presentan algunas de las ventajas en la utilización del HVDC. Partiendo de estas, se debe evaluar la conveniencia y necesidad de implementar un proyecto de esta envergadura en el país (Roses et al., 2022).

Por otro lado, Guamán (2019) subraya que la conversión de las líneas de corriente alterna existentes en el Sistema Nacional Interconectado (S.N.I.) a líneas de corriente continua podría reducir significativamente las estructuras requeridas para la transmisión de energía eléctrica. No obstante, esta propuesta ofrecería ventajas principalmente desde una perspectiva técnica y ambiental.

En cuanto a las ventajas económicas de los sistemas de transmisión en corriente continua de alta tensión

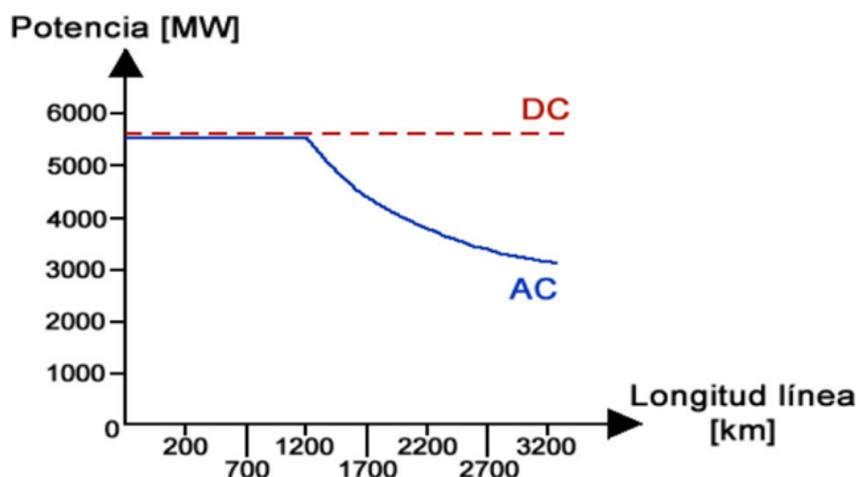
(HVDC) en comparación con los de corriente alterna (HVAC), estas se materializan cuando la longitud de la línea alcanza un punto de equilibrio. En este punto, la reducción de las pérdidas de energía y los menores costos de construcción compensan el elevado costo de las estaciones convertidoras. Si bien varios factores influyen en la determinación de este equilibrio, se estima que se alcanza en longitudes entre 400 y 800 km. Este rango sería ventajoso para el desarrollo de una nueva línea HVDC con una capacidad superior a 500 kV, con vistas a una planificación futura (Perez et al., 2014).

### Comparativa de tecnología HVAC y HVDC

En el transporte de energía eléctrica, los sistemas HVDC como los HVAC presentan diferencias considerables en términos de eficiencia y capacidad de conducción a largas distancias. Sin embargo, en forma de comparativa, una de las ventajas de los sistemas HVDC, es su capacidad para mantener la potencia casi independiente de la distancia, a diferencia de los sistemas HVAC donde la potencia disminuye a medida que aumenta la longitud de la línea, debido a los efectos inductivos, tal como se muestra en la Figura 2 (García, 2020).

Figura 2

Esquema de un sistema en configuración AC-DC-AC.



Fuente: (Jimenez, 2016)

Otra característica comparativa que se suele presentar en los sistemas HVAC, es el desfase producido por la inductancia entre los dos extremos de la línea, puesto que puede ocasionar la inestabilidad del sistema. Sin embargo, este fenómeno no se presenta en los sistemas HVDC por no estar afectados por la inductancia de la línea (Serrano et al., 2022).

Dentro de este orden de ideas, otra condición técnica existente en los sistemas de corriente alterna, es su imposibilidad de conectar dos sistemas que funcionan a diferente frecuencia (asíncronos). Es decir, que no se puede conectar un sistema eléctrico que opere a 60 Hz con uno que opere a 50 Hz, sin embargo, en estos casos se hace imprescindible el uso del HVDC, independientemente de la distancia que separe ambos sistemas, gracias a que esta tecnología permite realizar la conversión energética mediante inversores basados en electrónica de potencia, el cual, pueden variar la frecuencia de entrada con respecto a la salida y viceversa, para efectuar la transferencia de potencia eléctrica entre regiones o circuitos a frecuencias distintas (Khamphakdi et al., 2013).

A partir de las ventajas previamente mencionadas, se evidencia que el S.N.I. no está adecuadamente preparado para la implementación de redes HVDC. Además, el desarrollo de este tipo de líneas, ya sean aéreas, subterráneas o submarinas, podría generar más inconvenientes que beneficios, dadas las características actuales del sistema. Sin embargo, con el pasar del tiempo, o tal vez, con el desarrollo de nuevas tecnologías HVDC y por consiguiente del S.N.I., se conllevaría a la necesidad de la instalación de líneas HVDC dentro del sector eléctrico ecuatoriano, de este modo, bajo la situación actual, no es necesario, ni conveniente el desarrollo de este tipo de líneas.



### 3.3. Desafíos técnicos del HVDC

Los sistemas HVDC también tienen inconvenientes con respecto a los sistemas tradicionales HVAC, entre ellos, el principal obstáculo son los costos iniciales de instalación, por lo general, este viene a ser un factor determinante al momento de escoger entre una tecnología y la otra. Por ello, es crucial tener en cuenta los costos directos de una instalación, como son: las líneas, las estaciones convertidoras, los transformadores, las protecciones, entre otros equipos secundarios, y los costos indirectos que se traducen a las pérdidas capitalizadas de la línea. Esto permite deducir que en los sistemas HVDC los costos directos son mayores a los que se incurren en los sistemas HVAC, en especial los que concierne las estaciones convertidoras y los transformadores (Serrano et al., 2022).

A pesar de sus beneficios, la transmisión HVDC enfrenta varios obstáculos que limitan su adopción generalizada. Entre estos se destacan la falta de estandarización e interoperabilidad, lo que dificulta la coordinación e integración entre distintos sistemas HVDC y proveedores, incrementando la complejidad y el riesgo de los proyectos. Además, las barreras regulatorias e institucionales generan incertidumbre, lo que retrasa la planificación, la obtención de permisos y el financiamiento, afectando la distribución de costos y beneficios entre las partes involucradas (Avo y Suyire, 2022).

Por otro lado, los sistemas basados en HVDC, no tienen limitación práctica de la distancia en la transmisión eléctrica, y necesitan menos longitud de cableado que su equivalente en HVAC, esto produce una reducción de los costos de cable y de instalación, así como de impacto ambiental y de la tasa de fallo, lo que reduce también los costos de mantenimiento (Serrano et al., 2022).

Otro factor a considerar es la estabilidad transitoria, en estos sistemas al momento de presentarse un evento repentino, como la apertura de un equipo, un cortocircuito, o alguna maniobra que haga desestabilizar el sistema, las redes HVDC son capaces de controlar el voltaje en sus dos extremos, con el fin de minimizar el impacto sobre el sistema completo, de igual forma, permite atenuar y en algunos casos mitigar las perturbaciones electromagnéticas que se presentan en consecuencia de la falla existente (Rosero, 2020).

Por último, los problemas técnicos y operativos como los armónicos, los transitorios de conmutación, la coordinación del aislamiento, la detección y despeje de fallas, el control y la comunicación también pueden ser un obstáculo para el funcionamiento de la transmisión HVDC (Liu y Chen, 2011).

### 3.4. Consideraciones futuras

En la última década, en Ecuador se ha dado un cambio en la matriz energética, y gracias a eso se puede considerar la implementación de redes HVDC a largo plazo, una de sus aplicaciones se da en las centrales eólicas que se encuentren distantes al S.N.I ecuatoriano, y en el caso de las centrales eólicas marinas, se puede transportar la energía eléctrica en DC, desde alta mar, en donde existen vientos fuertes, hasta la estación en tierra firme (Lüth et al., 2012).

La evolución de las tendencias tecnológicas, y el aumento de la generación de energía renovable variable, requieren de operadores multi-energía con conexión unitaria, el cual, pueden enlazar directamente a las centrales como son las hidroeléctricas y eólica, donde, se puede aprovechar el máximo potencial de las turbinas sin importar su velocidad, a razón que los convertidores pueden controlar la modulación a la frecuencia fundamental del sistema (Rodríguez, 2011).

Otra aplicación a futuro del HVDC se puede dar en Ecuador con las centrales solares fotovoltaicas, ya que estas, mediante las placas fotovoltaicas generan energía eléctrica en DC, y mediante convertidores DC-DC pueden elevar el voltaje y transportarlo hasta llegar a una estación DC-AC, y efectuar la conexión al S.N.I ecuatoriano (Lüth et al., 2012; Anaya et al., 2023).

Además, el HVDC tiene mucha utilidad en los sistemas de almacenamiento de energía en batería (BESS), ya que estos son parte esencial en todo sistema de energía renovable como gestor energético, debido a

que permite almacenar la energía en horas de poca demanda y suministrarla cuando el sistema este en alta demanda, sin embargo, el HVDC y los BESS pueden combinarse en ubicaciones remotas al S.N.I o en las regiones insulares, en el caso ecuatoriano, concretamente en las islas Galápagos, el cual cuenta con algunas centrales solares fotovoltaicas, eólicas, centrales híbridas dual térmica, y los BESS como soporte de red (Baruschka y Mertens, 2011; MEER, 2017).

Por otro lado, muchos países de América Latina cuentan con planes similares al Plan Maestro de Electricidad de Ecuador, donde se evalúan los aspectos clave para estimar la capacidad de generación eléctrica que deberá incorporarse mediante proyectos futuros. Esto permite mantener un margen seguro en la proyección de la demanda y garantizar el suministro eléctrico para todos los usuarios (MEM, 2024).

Un ejemplo de esto es Chile, donde entre 2021 y 2024 se planificaron varios proyectos, de los cuales el 94.6% están enfocados en energías renovables, lo que resultará en una expansión de 6.675 MW de potencia durante ese período (Asociación de Generadores de Chile, 2021), mientras que en Ecuador, los proyectos planteados a partir del 2021 hasta el 2027 según el Plan Maestro de Electricidad (2018), un gran porcentaje de energía generada es aprovechada de energías renovables, y partiendo del caso base, estas centrales aportan una potencia de 3.399,8 MW, mientras que en el caso matriz productiva la potencia instalada será de 6.199 MW, de tal manera introduciéndose a una etapa de seguridad energética en ambos países si estos proyectos son realizados en su totalidad.

Además, el cuidado del medio ambiente ha representado el cambio de la matriz energética en varios países de la región, y al ver la posibilidad de integrar la movilidad eléctrica como opción a la descarbonización del planeta, en tal sentido, países como Brasil y Chile han implementado políticas regulatorias que ofrezcan incentivos y subsidios para usuarios que carguen sus vehículos eléctricos durante las noches, en donde, existe poca demanda (Asociación de generadores de Chile, 2021).

En Ecuador, uno de los sectores que más consumo de recursos naturales tiene es el eje de transporte, el cual en el año 2014 tuvo el 42% del total del consumo energético nacional, siendo el diésel (45%), la gasolina (41%), el fuel oil (7%), y la Electricidad en baja proporción (MEER, 2017).

Sin embargo, el Ministerio de Electricidad y Energías Renovables, pretende la reducción del consumo en este sector, y mediante el Plan Nacional de Eficiencia Energética se establecen nuevas reformas de subsidios e incentivos, para que los vehículos eléctricos e híbridos se incorporen al país, pero para que esto se cumpla, primero se debe evaluar la capacidad del sistema para gestionar la carga rápida de estos vehículos, además de que la expansión de generación sea la adecuada para no tener ningún déficit en la demanda con la masificación de las electrolinerías en el país, sin embargo, se podría independizar las electrolinerías del sistema eléctrico convencional y planificar microrredes inteligentes a HVDC provenientes de centrales fotovoltaicas (Perez et al., 2014; MEER, 2017).

### 3.5. Innovaciones tecnológicas

De igual forma, las grandes empresas a nivel global también han generado avances significativos en la tecnología HVDC, tal como es el caso de ABB que hizo el desarrollo de convertidores de fuente de voltaje (VSC) para mejorar la estabilidad y el control del sistema de transmisión. Por su parte, Siemens Energy desarrollo convertidores modulares multiniveles (MMC), su aplicabilidad se da más en las interconexiones submarinas proporcionando confiabilidad en la transmisión eléctrica (Knaak, 2011).

El HVDC ha sido una solución que ha revolucionado el ámbito de la transmisión eléctrica, destacando por su gran capacidad en el transporte de grandes niveles de energía, y largas distancias. Uno de los avances considerables de esta tecnología se da en el Reino Unido y Noruega, el cual, desarrollaron un proyecto llamado “North Sea Link” que aprovecha el suministro eléctrico HVDC proveniente de parques eólicos marinos a través del mar del Norte, integrando de manera correcta las redes eléctricas entre dos países (Haileselassie y Uhlen, 2013).

Además, a nivel de interconexión de sistemas eléctricos, el HVDC destaca ser una tecnología viable para la creación de redes eléctrica a gran escala con la creación de supergrids, como es el caso de Francia y España, el cual, desarrollaron un proyecto conocido como “Bixas Santa Llogaia”, transmitiendo 320 kV a una longitud de 64.5 km, demostrado mejoras en la seguridad del suministro eléctrico y en la estabilidad de la red entre países (Knaak, 2011).



En China se ejecutó un proyecto de transmisión de energía eléctrica en Ultra High Voltage DC (UHVDC) a un nivel de  $\pm 800$  kV, siendo de esta forma, ideal para transportar electricidad a largas distancias con la menor cantidad de pérdidas técnicas (Hong et al., 2008).

#### 4. Conclusiones

La transmisión HVDC presenta múltiples beneficios para los sistemas energéticos, como la reducción de pérdidas y el aumento de la capacidad de transmisión, especialmente en distancias largas y en entornos submarinos. Además, el HVDC contribuye a mejorar la estabilidad y seguridad de la red, permitiendo el control independiente de la potencia activa y reactiva, y ofreciendo una respuesta rápida y flexible ante perturbaciones y fallos.

Los avances del HVDC a nivel global han demostrado su capacidad para transformar la transmisión de energía eléctrica, facilitando la integración de centrales renovables y al mismo tiempo mejorando indicadores de eficiencia energética y la estabilidad de las redes eléctricas, en este sentido, Ecuador tiene cierto rezago en la adopción de esta tecnología, y los beneficios mostrados a nivel mundial sugieren un potencial considerable para su implementación a futuro, especialmente en el marco de la expansión de las energías renovables y en la mejora de la infraestructura de transmisión eléctrica, sin embargo, para avanzar con la acogida de la transmisión HVDC en Ecuador, es necesario impulsar varios proyectos pilotos a futuro en los sectores más estratégicos, con la finalidad de mostrar su viabilidad técnica y económica mediante el modelamiento y simulaciones efectuadas en herramientas computacionales como puede ser PowerFactory DIgSILENT®, EtapDraw® y EVIEWS®, estas permiten simular el comportamiento dinámico y apreciar el impacto del HVDC en la red eléctrica, diseñar el sistema de protección, y realizar el análisis econométrico para evaluar los beneficios a largo plazo, por lo tanto, su utilización garantiza un análisis robusto y preciso, crucial para la adopción a futuro del HVDC en Ecuador.

#### Referencias bibliográficas

- Alassi, A., Bañales, S., Ellabban, O., Adam, G., & MacIver, C. (2019). HVDC transmission: Technology review, market trends and future outlook. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112, 530-554. Url: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032119302837>
- Anaya-Ruiz, G. A., Robles, D. R., Caballero, L. E. U., & Moreno-Goytia, E. L. (2023). Design and prototyping of transformerless DC-DC converter with high voltage ratio for MVDC applications. *IEEE Latin America Transactions*, 21(1), 62-70. doi: <https://doi.org/10.1109/TLA.2023.10015127>
- Asociación de Generadores de Chile. (2021). Reporte Anual 2021. Url: <https://generadoras.cl/documentos/reportes-anales/reporte-anual-2021>
- Ayo, A., & Suvire, G. (2022, September). Planning for Electric Power Exchange with HVDC Links: Concepts and New Approaches. In *2022 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON)* (pp. 1-6). IEEE. Url: <https://doi.org/10.1109/ARGENCON55245.2022.9939918>
- Baruschka, L., & Mertens, A. (2011). Comparison of cascaded H-bridge and modular multilevel converters for BESS application. In *2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition* (pp. 909-916). IEEE. doi: <https://doi.org/10.1109/ECCE.2011.6063868>
- García Aguilar, C. (2020). Descripción y estudio de los enlaces HVDC en los sistemas eléctricos (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya). Url: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/185216/tfg-cristina-garcia.pdf>

- Guamán Caiza, G. D. (2019). Análisis comparativo de las alternativas de interconexión Ecuador-Perú usando sistemas de transmisión en corriente alterna y corriente directa (Bachelor's thesis, Quito, 2019.). Url: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20291>
- Haileselassie, TM y Uhlen, K. (2013). Seguridad del sistema eléctrico en una red HVDC en malla del Mar del Norte. *Actas del IEEE*, 101(4), 978-990. doi: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2013.2241375>
- Han, M., & Gole, A. (Eds.). (2020). Modeling and simulation of HVDC transmission. Institution of Engineering and Technology. Url: <https://digital-library.theiet.org/content/books/po/pbpo116e>
- Hong, R., Bing, L., Li, X., Zongyuan, C. y Li, L. (2008). Desarrollo de tecnología de transmisión UHVDC de  $\pm 800$  kV en China. En la Conferencia internacional de 2008 sobre ingeniería y aplicación de alto voltaje (pp. 1-7). IEEE. doi: <https://doi.org/10.1109/ICHVE.2008.4773859>
- Jiménez Bahamón, L. (2016). Impacto de la transmisión HVDC en la estabilidad transitoria del sistema de potencia. Url: <http://hdl.handle.net/2117/185216>
- Khamphakdi, P., Sekiguchi, K., Hagiwara, M., & Akagi, H. (2013, June). Design and experiment of a back-to-back (BTB) system using modular multilevel cascade converters for power distribution systems. In 2013 IEEE ECCE Asia Downunder (pp. 311-317). IEEE. doi: <https://doi.org/10.1109/ECCE-Asia.2013.6579114>
- Knaak, H. J. (2011). Modular multilevel converters and HVDC/FACTS: A success story. In Proceedings of the 2011 14th European conference on power electronics and applications (pp. 1-6). IEEE. Url: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6020674/citations#citations>
- Landi Placencia, A. X., & Macancela Allaico, K. I. (2023). Modelación y simulación de un sistema de transmisión eléctrica de alta tensión con corriente continua (HVDC) mediante ATPDraw (Bachelor's thesis). Url: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/24463>
- Liu, Y., y Chen, Z. (2011). Análisis de estabilidad de voltaje transitorio y mejora de una red con diferentes sistemas HVDC. En la reunión general de la IEEE Power and Energy Society de 2011 (pp. 1-8). IEEE. doi: <https://doi.org/10.1109/PES.2011.6039182>
- López Cortés, J. F. (2017). Control predictivo en convertidores de corriente multi-nivel para aplicaciones HVDC. Url: <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/959e844d-e5ca-4ba3-8d1f-6881a61765df/content>
- Lüth, T., Merlin, M. M. C., Green, T. C., Barker, C. D., Hassan, F., Critchley, R. W., ... & Dyke, K. (2012). Performance of a DC/AC/DC VSC system to interconnect HVDC systems. In 10th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2012) (pp. 1-6). IET. Doi: <https://doi.org/10.1049/cp.2012.1971>
- MEER. (2017). Plan Nacional de Eficiencia Energética 2016-2035. Url: <https://n9.cl/u1v0l>
- MEM. (2024). Ministerio de Energía y Minas – Planificación Estratégica. Url: <https://www.rekursosyenergia.gob.ec/planificacion-estrategica-2/>
- MERNNR. (2018). Plan Maestro de Electricidad 2018-2025. Url: <https://www.rekursosyenergia.gob.ec/plan-maestro-de-electricidad/>
- Perez, M. A., Bernet, S., Rodriguez, J., Kouro, S., & Lizana, R. (2014). Circuit topologies, modeling, control schemes, and applications of modular multilevel converters. *IEEE transactions on power electronics*, 30(1), 4-17. doi: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2014.2310127>
- Rodríguez Ramiro, F. J. (2011). Comparativa convertidores HVDC-VSC. Grupo Tecnología Electrónica Universidad de SEVILLA, Sevilla. Url: <https://n9.cl/j11o1>
- Rosero, R. (2020). Una Revisión Acerca de Tecnologías y Modelación de Enlaces HVDC para Estudios Eléctricos. *Innovation & Development in Engineering and Applied Sciences*, 2(1), 19-19. Url: <http://201.159.222.149/index.php/ideas/article/view/363>
- Rosés, R. E., Giménez, M. D. C., & Palacios, S. (2022). Beneficios de la Transmisión de Energía Eléctrica



en Corriente Continua en Sistemas con Alta Penetración de Energía Renovable. In 2022 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON) (pp. 1-7). IEEE. doi: <https://doi.org/10.1109/ARGENCON55245.2022.9940086>

Serrano-González, J., Riquelme-Santos, J., & Arcos-Vargas, A. (2022). Transporte de energía en HVDC. El resurgir tecnológico de la corriente continua. DYNA Publishing, 97(3), 226-228. Url: <http://184.168.116.25/index.php/DYNA/article/view/891>

Trintis, I., Munk-Nielsen, S., & Teodorescu, R. (2011, November). A new modular multilevel converter with integrated energy storage. In IECON 2011-37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (pp. 1075-1080). IEEE. doi: <https://doi.org/10.1109/IECON.2011.6119457>