

Mejoramiento del medio de ambiente mediante la propuesta de líneas de transmisión en DC

Improving the environment through the proposal of DC transmission lines

Fabrizio Armando Millan Montalvo¹  ORCID, Raúl Vilcahuamán Sanabria¹ ORCID, Oner Rogerio Lozano Flores¹ ORCID y Piero Prado Zuta¹ ORCID.

¹Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur, Lima – Perú

RESUMEN

Este artículo aborda una visión detallada de la tecnología de sistemas de transmisión HVDC (corriente continua de alto voltaje) y su impacto en la conservación del medio ambiente a través de la transmisión de energía eléctrica. El desarrollo de este trabajo de investigación tiene como objetivo demostrar que el uso de líneas de transmisión de corriente continua en comparación con la corriente alterna, es mucho más eficiente en el cuidado del medio ambiente y la eficiencia energética. Para demostrar que el sistema de transmisión de corriente continua hace uso de menores áreas cuadradas de terreno en su instalación, se ha realizado con las medidas de ancho mínimo de franja de servidumbre establecidas en el código eléctrico nacional (CNE) y para el cálculo de las pérdidas resistivas se utilizó el software CONSOL Multiphysics en conjunto con Matlab para el modelado, se tomó como referencia Pucallpa a Buenaventura. El uso de la tecnología HVDC demuestra como resultado que proporciona una mejor preservación del medio ambiente debido a la reducción del área para su instalación, menores pérdidas resistivas y el efecto corona. Finalmente, concluimos la gran importancia que tiene instalar el sistema de transmisión de corriente continua en el mundo porque permite el uso de menores de espacio de área de terreno preservando la flora y la fauna, cuidando el medio ambiente y reduciendo las pérdidas de energía.

Palabras clave: sistema de transmisión, medio ambiente, HVDC, HVAC, perdidas energía.

ABSTRACT

This article addresses a detailed overview of HVDC (high voltage direct current) transmission system technology and its impact on environmental conservation through the transmission of electrical energy. The development of this research work aims to demonstrate that the use of direct current transmission lines compared to alternating current is much more efficient in caring for the environment and energy efficiency. To demonstrate that the direct current transmission system makes use of smaller square areas of land in its installation, it has been carried out with the minimum width measurements of the easement strip established in the national electrical code (CNE) and for the calculation of the resistive losses, CONSOL Multiphysics software was used in conjunction with Matlab for modeling, Pucallpa to Buenaventura was taken as a reference. The use of HVDC technology demonstrates as a result that it provides better preservation of the environment due to the reduction of the area for its installation, lower resistive losses and the corona effect. Finally, we conclude the great importance of installing the direct current transmission system in the world because it allows

the use of less land area space, preserving flora and fauna, caring for the environment and reducing energy losses.

KEY WORDS: transmission system, environment, HVDC, HVAC, energy losses.

INTRODUCCION

El desarrollo de la corriente directa (CD) comenzó en el siglo XIX con Thomas Alva Edison, quien implementó el primer sistema de iluminación de CD en Nueva York, EE. UU. Debido a que inicialmente presentaba problemas de pérdidas eléctricas y limitaciones de tensión, fue eventualmente superado por la corriente alterna (CA) de Nikola Tesla, que permitía la transmisión eficiente de electricidad a largas distancias. Sin embargo, se reavivó el interés en la CD con avances como la válvula de vapor de mercurio de Hewitt y la válvula de alta tensión de Asea, que más tarde se fusionó con Brown Boveri para formar ABB. La tecnología evolucionó con la introducción de dispositivos como tiristores y convertidores IGBT, permitiendo la conversión eficiente entre CA y CD, y estableciendo la CD como una opción eficiente y segura en proyectos eléctricos a nivel mundial. (Vilcahuaman, Portal, Millan, Lozano, & Prado, 2023)

La transmisión de electricidad en corriente continua de alto voltaje, conocida como HVDC por sus siglas en inglés, ha revolucionado la forma en que se transporta la energía eléctrica a largas distancias. A diferencia de la corriente alterna (AC), que ha sido el estándar predominante en la distribución de energía eléctrica durante más de un siglo, la HVDC ofrece una serie de ventajas significativas en términos de eficiencia, capacidad de carga y capacidad de transmisión a larga distancia.

Una de las principales ventajas de la transmisión HVDC es su capacidad para minimizar las pérdidas de energía durante la transmisión. A diferencia de la corriente alterna, que experimenta pérdidas por resistencia en los cables y transformadores, la HVDC puede transportar energía a distancias mucho mayores con menos pérdidas. Esto se debe a que la corriente continua no sufre los mismos efectos de la impedancia capacitiva e inductiva que afectan a la corriente alterna en líneas de transmisión largas. (Canizal, 2022)

Además de su eficiencia mejorada, la HVDC también ofrece una mayor capacidad de carga en las líneas de transmisión. Esto significa que se pueden transportar más mega watts de electricidad a través de una línea de HVDC en comparación con una línea de corriente alterna de tamaño similar. Esta capacidad de carga mejorada es especialmente útil para transportar energía generada por fuentes de energía renovable, que a menudo están ubicadas en áreas remotas lejos de los centros de consumo de energía. (Morales Osorio & Alarcón Gonzáles, 2020).

Otra ventaja clave de la transmisión HVDC es su capacidad para interconectar redes eléctricas que operan en diferentes frecuencias o sistemas de voltaje. Esto es particularmente útil para integrar sistemas de energía dispersos, como podría ser el caso de una interconexión entre las redes de Perú y Colombia, ya que la HVDC puede actuar como un puente entre redes eléctricas con características diferentes. Además, de esta manera se contribuye al aumento de la eficiencia y competitividad de los mercados vecinos, dando lugar a nuevas fuentes de ingresos y reducción de precios en la energía. (Rueda García, 2023)

Es por esto que la transmisión de electricidad en HVDC representa una innovación significativa en el campo de la distribución de energía eléctrica. Su capacidad para minimizar

las pérdidas de energía, aumentar la capacidad de carga y facilitar la integración de fuentes de energía de distintas procedencias lo convierte en una herramienta indispensable para la transmisión eficiente y confiable de energía a largas distancias.

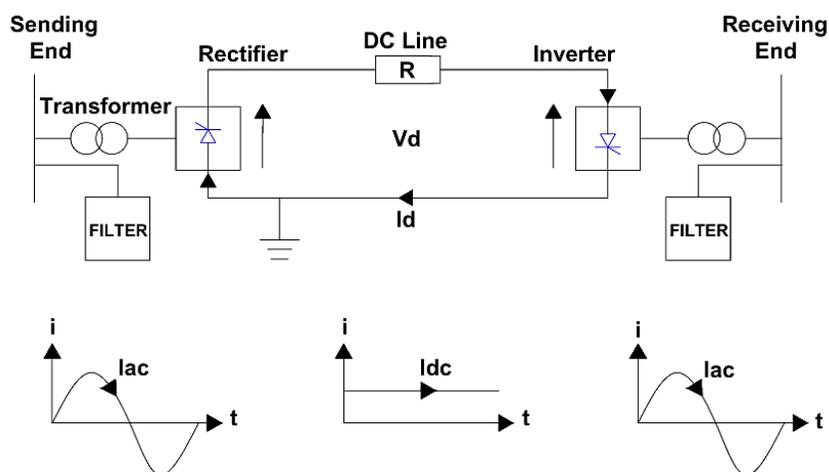
El objetivo principal de este trabajo es demostrar que el sistema de transmisión de corriente directa frente a la corriente alterna es mucho más factible por el menor impacto ambiental y eficiencia energética.

Sistema de transmisión en corriente directa

La tecnología HVDC (ya sea LCC o VSC) es un sistema de transmisión del sistema eléctrico, aplicado para altos niveles de tensión y potencia instalada, esto crea un menor uso de infraestructura, cables, instalación y mantenimiento. Se caracteriza que posee el desacople en tensión y frecuencia del sistema offshore (planta de generación) del onshore (red e instalación en tierra). Este tipo de tecnología se ha aplicado en instalaciones offshore dentro de ellos tenemos parques eólicos offshore, plataformas de petróleo y gas, para transferir la potencia se usa tres tipos: Corriente Alterna en Alta Tensión (High Voltage Alternate Current, HVAC), Corriente Continua en Alta Tensión con Convertidor Conmutador de Línea (High Voltage Direct Current with Line Commutated Converter, HVDC LCC), Corriente Continua en Alta Tensión con Convertidor Fuente de Tensión (High Voltage Direct Current with Voltage Source Converter, HVDC VSC). Por otro lado, la tecnología HVAC se usa en gran medida en distancias cortas entre 50-80 km. Respecto al transporte de la potencia instalada en cables AC offshore presenta limitaciones, esto se debe a la distancia para transportar, la cual los conductores generan potencia reactiva. (Morales Osorio & Alarcón Gonzáles, 2020)

Figura 1

Esquema del sistema de transmisión HVDC



Nota. Elaboración propia.

Para el cálculo de la intensidad de corriente directa (I_{dc}) se hace uso de la siguiente fórmula:

$$I_{dc} = \frac{U_f - U_i}{R}$$

Tenemos:

I_{dc} = Flujo eléctrico a lo largo del conductor de transmisión DC.

U_f = Tensión de salida con respecto al rectificador DC.

U_i = Tensión de entrada del inversor DC.

R = Resistencia de la línea DC.

Faja de servidumbre

La faja servidumbre es la ocupación de superficie y de los aires necesarios de la proyección sobre el suelo del área ocupada por la infraestructura, conductores y su distancia de seguridad del poste o torre eléctrica. El ancho mínimo sobre la faja servidumbre lo indica el código nacional de electricidad - suministro 2011, Sección 21. Requerimientos Generales, 219.B. Requerimientos de la faja de servidumbre en la tabla 219, siendo para HVAC es de 64 metros.

Según el IEEE indica que la faja de servidumbre es de 45.5 metros para HVDC. (Michi, Donnini, Giordano, Scavo, Luciano, Aluisio & L'Abbate, 2019)

Figura 2

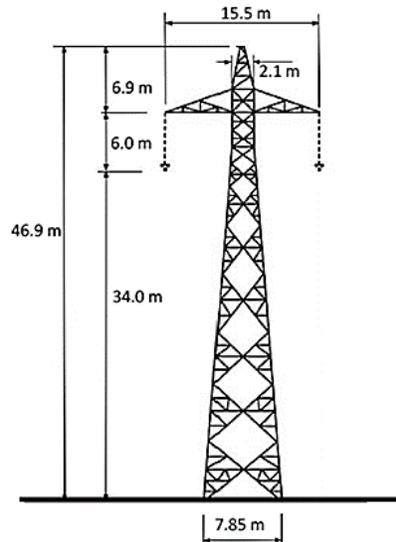
Anchos mínimos de fajas de servidumbres en HVAC para 10KV–500KV

TABLA 219	
Anchos mínimos de fajas de servidumbres	
Tensión nominal de la línea (kV)	Ancho (m)
10 - 15	6
20 - 36	11
50 - 70	16
115 - 145	20
200	25
500	64

Nota. Regla 219. Código Nacional de Electricidad - Suministro 2011

Figura 3

Ancho mínimo de faja de servidumbre en HVDC para 500KV



Nota. New HVDC technology in Pan-European power system planning. IEEE

Comparativo del impacto ambiental entre líneas HVDC y HVAC

- Línea HVAC

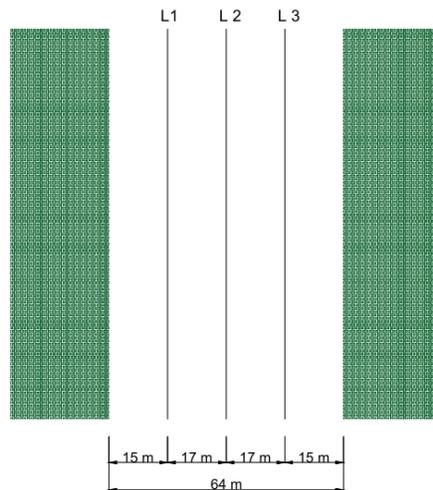
Figura 4

Líneas de transmisión: HVAC-500kV-3000MW



Nota. Recuperado de HVAC vs HVDC (Alterna vs continua – Alta tensión), Sector Electricidad, Marzo 2015.

Cálculo del área:



A deforestada AC = Largo x Ancho = (1676.63 Km) x (0.064 km) = 107.3 Km²

- **Línea HVDC**

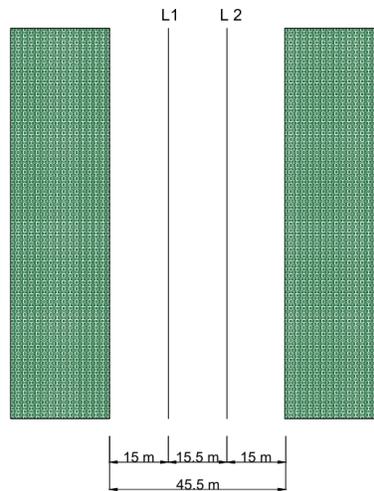
Figura 5

Líneas de transmisión: HVDC-500kV-3000MW



Nota. Recuperado de HVAC vs HVDC (Alterna vs continua – Alta tensión), Sector Electricidad, Marzo 2015.

Cálculo del área:



$$A \text{ deforestada DC} = \text{Largo} \times \text{Ancho} = (1676.63 \text{ Km}) \times (0.0455 \text{ km}) = 76.29 \text{ Km}^2$$

Diferencia de áreas cuadradas de la franja de servidumbre:

$$A \text{ deforestada AC} - A \text{ deforestada DC} = 107.3 \text{ Km}^2 - 76.29 \text{ Km}^2 = 31.01 \text{ m}^2$$

Tabla 1
Diferencias económicas de un proyecto HVDC y HVSC

Alternative	DC Alternatives				AC Alternatives		
	+ 500 Kv Bipole	2 × +500 kV 2 bipoles	+600 kV Bipole	+800 kV Bipole	500 kV 2 Single Ckt	500 kV Double Ckt	765 kV 2 Singl Ckt
Capital Cost							
Rated Power (MW)	3000	4000	3000	3000	3000	3000	3000
Station costs including reactive compensation (M\$)	\$420	\$680	\$465	\$510	\$542	\$542	\$630
Transmission line cost (M\$/mile)*	\$1.60	\$1.60	\$1.80	\$1.95	\$2.00	\$3.20	\$2.80
Distance in miles*	750	1,500	750	750	1,500	750	1,500
Transmission Line Cost (M\$)	\$1,200	\$2,400	\$1,350	\$1,463	\$3,000	\$2,400	\$4,200
Total Cost (M\$)	\$1,620	\$3,080	\$1,815	\$1,973	\$3,542	\$2,942	\$4,830
Annual Payment, 30 years @ 10%	\$172	\$327	\$193	\$209	\$376	\$312	\$512
Cost per kW-Yr	\$57.28	\$81.68	\$64.18	\$69.75	\$125.24	\$104.03	\$170.77
Cost per MWh @ 85% Utilization Factor	\$7.69	\$10.97	\$8.62	\$9.37	\$16.82	\$13.97	\$22.93
Losses @ full load	193	134	148	103	208	208	139
Losses at full load in %	6.44%	3.35%	4.93%	3.43%	6.93%	6.93%	4.62%
Capitalized cost of losses @ \$1500 kW (M\$)	\$246	\$171	\$188	\$131	\$265	\$265	\$177
Parameters:							
Interest rate %	10%						
Capitalized cost of losses \$/kW	\$1,500						
Note:							
AC current assumes 94% pf							
Full load converter station losses = 9.75% per station							
Total substation losses (transformers, reactors) assumed = 0.5% of rated power							

Nota. Recuperado de The ABCs of HVDC Transmission Technologies: An overview of high voltage direct current systems and applications, Michael P. Bahrman & Brian K. Johnson, 2007, IEEE Power and Energy Magazine.

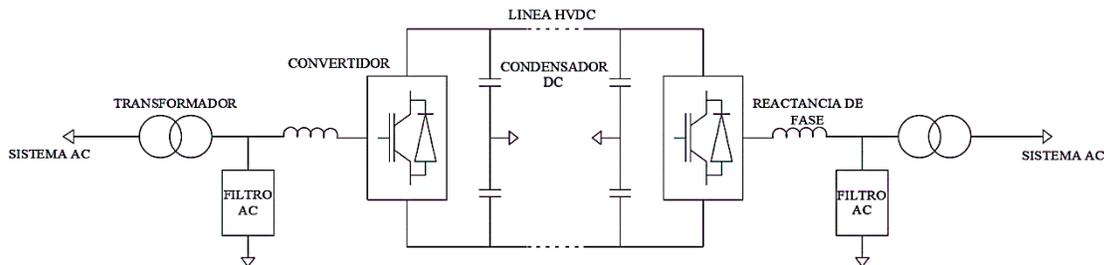
1. Metodología

1.1. Antecedentes

A. Tecnología SVC-HVDC para la transmisión y control de sistemas eléctricos de potencia

La tecnología VSC (Voltage Source Converter) ofrece una alternativa importante a los sistemas LCC-HVDC (Line-Commutated Converter - High Voltage Direct Current), basada en convertidores formados por transistores IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). Estos dispositivos permiten el control de altas potencias a altas frecuencias de conmutación, lo que posibilita el control independiente de la potencia reactiva y activa sin necesidad de compensadores estáticos ni bancos de condensadores como en la tecnología LCC. El transistor IGBT consta de tres terminales: Drenador, Puerta y Surtidor, y puede controlarse mediante tensión, a diferencia de los tiristores que se controlan por corriente. La inversión del flujo de potencia en los VSC se logra mediante la inversión del flujo de corriente. Esta tecnología presenta pocos armónicos, lo que reduce la necesidad de filtros en las subestaciones. Sin embargo, requiere filtrado de corrientes cercanas a las de conmutación de los IGBTs. Aunque los VSCs tienen ventajas, presentan mayores pérdidas que los LCC-HVDC. (García Aguilar, 2020)

Figura 6
Esquema del sistema VSC-HVDC

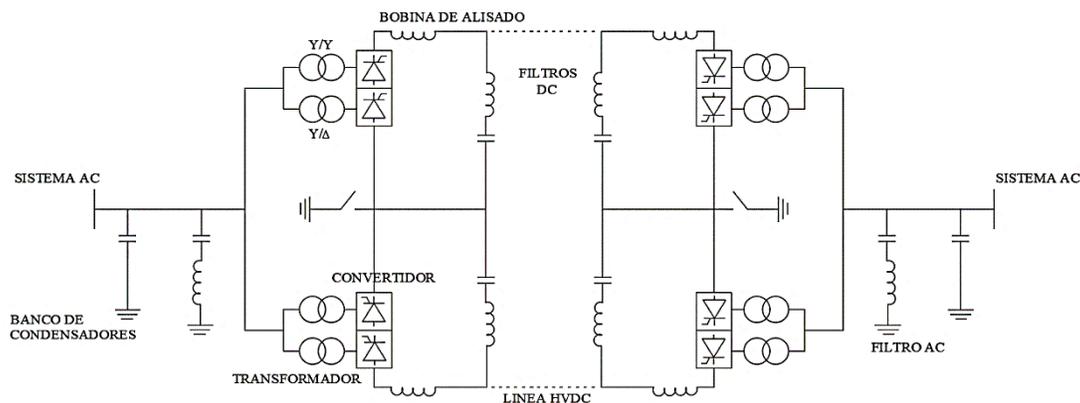


Nota. Recuperado y adaptado de Transporte de energía eléctrica por corriente continua. Ignacio, R. Universidad de Cantabria.

B. Tecnología LCC-HVDC para la transmisión y control de sistemas eléctricos de potencia

Los sistemas HVDC basados en convertidores LCC son ampliamente utilizados en la transmisión de energía a largas distancias. Emplean tiristores como dispositivos semiconductores para la conversión de potencia. Estos tiristores son unidireccionales, requiriendo invertir la polaridad de la tensión para cambiar la dirección de la potencia en sistemas LCC-HVDC. Sin embargo, la capacidad de control de los convertidores LCC es limitada, ya que solo pueden ser encendidos, no apagados de manera controlada, dificultando el control de potencia reactiva. Para compensar esto, se necesitan dispositivos de compensación como bancos de condensadores o compensadores estáticos, especialmente en líneas de transmisión largas donde las caídas de tensión son importantes. Además, los convertidores LCC-HVDC generan armónicos que deben ser mitigados con filtros, aumentando la complejidad de las subestaciones. A pesar de estas limitaciones, los sistemas LCC-HVDC son conocidos por tener menores pérdidas de potencia en comparación con los sistemas HVDC basados en convertidores VSC. (Rodríguez Freire, 2016)

Figura 7
Esquema del sistema LCC-HVDC



Nota. Recuperado y adaptado de Transporte de energía eléctrica por corriente continua. Ignacio, R. Universidad de Cantabria.

1.2. Método

El método propuesto para esta investigación consiste en utilizar dos softwares de simulación siendo el CONSOL Multiphysics y MATLAB, mediante el método de los elementos finitos, para la representación y codificación de ecuaciones.

Para poder calcular el valor de campo eléctrico en los respectivos subconductores se hizo uso del COMSOL Multiphysics aplicando el uso del método de los elementos finitos considerando la influencia del aire e intervención de toda la estructura metálica de la torre transmisión que se encuentra conectada a tierra, por las distancias tanto de la torre como de sus subconductores se simplifico en los elementos 1D. (Vilcahuaman, Portal, Millan, Lozano, & Prado, 2023)

Las pérdidas resistivas derivan de fórmulas elementales.

$$P_{RL} = 2nRL \left(\frac{S_m}{2U_n} \right)^2$$

S_m : potencia máxima

U : voltaje bipolar de las líneas

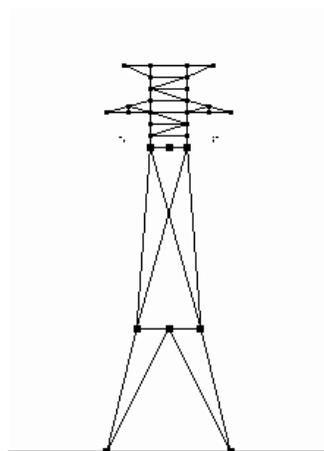
R : resistencia lineal

g : campo eléctrico

$\nabla \cdot \mathbf{D}$: gradiente del campo

Figura 8

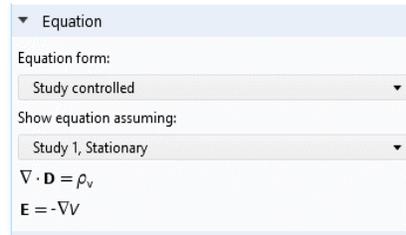
Recreación de estructura de torre con elementos 1D en COMSOL Multiphysics



Nota. Elaboración propia

Figura 9

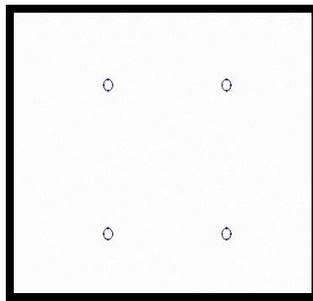
Ecuaciones electrostáticas utilizadas para resolver el modelo en COMSOL



Nota. Recuperado de la interfaz del programa COMSOL Multiphysics.

Figura 10

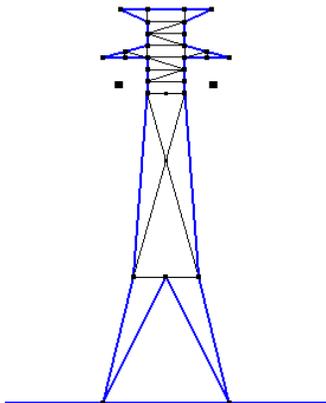
Contornos para las condiciones de +V en subconductores de la derecha



Nota. Elaboración propia

Figura 11

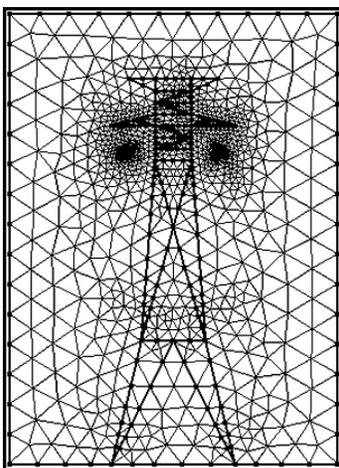
Contornos para las condiciones de V=0 en contorno de torre de transmisión



Nota. Elaboración propia

Figura 12

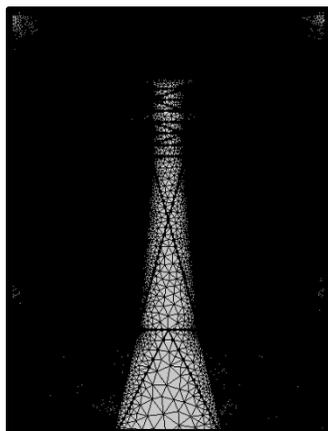
Malla inicial generada por COMSOL $n=0$



Nota. Elaboración propia

Figura 13

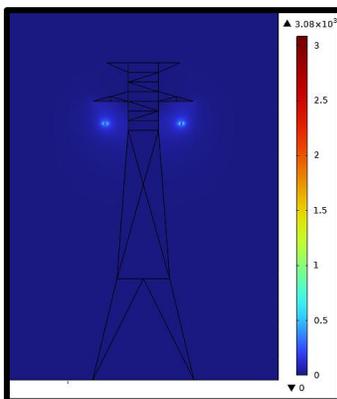
Malla final generada por COMSOL $n=7$



Nota. Elaboración propia

Figura 14

Resultados finales para el campo eléctrico en kV/m para subconductores AAAC de 1291mm²



Nota. Elaboración propia

Las fórmulas usadas son logarítmicas de las pérdidas por el efecto corona en mal clima y buen clima agregado al código del Matlab que se pueden convertir de dB a W y luego a MW.

$$P_{bt} = P_0 + 50 \log\left(\frac{g}{g_0}\right) + 30 \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + 20 \log\left(\frac{n}{n_0}\right) - 10 \log\left(\frac{HS}{H_0 S_0}\right)$$

$$P_{mt} = P_0 + 40 \log\left(\frac{g}{g_0}\right) + 20 \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + 15 \log\left(\frac{n}{n_0}\right) - 10 \log\left(\frac{HS}{H_0 S_0}\right)$$

P_{bt} y P_{mt} : pérdidas para buen tiempo y mal tiempo

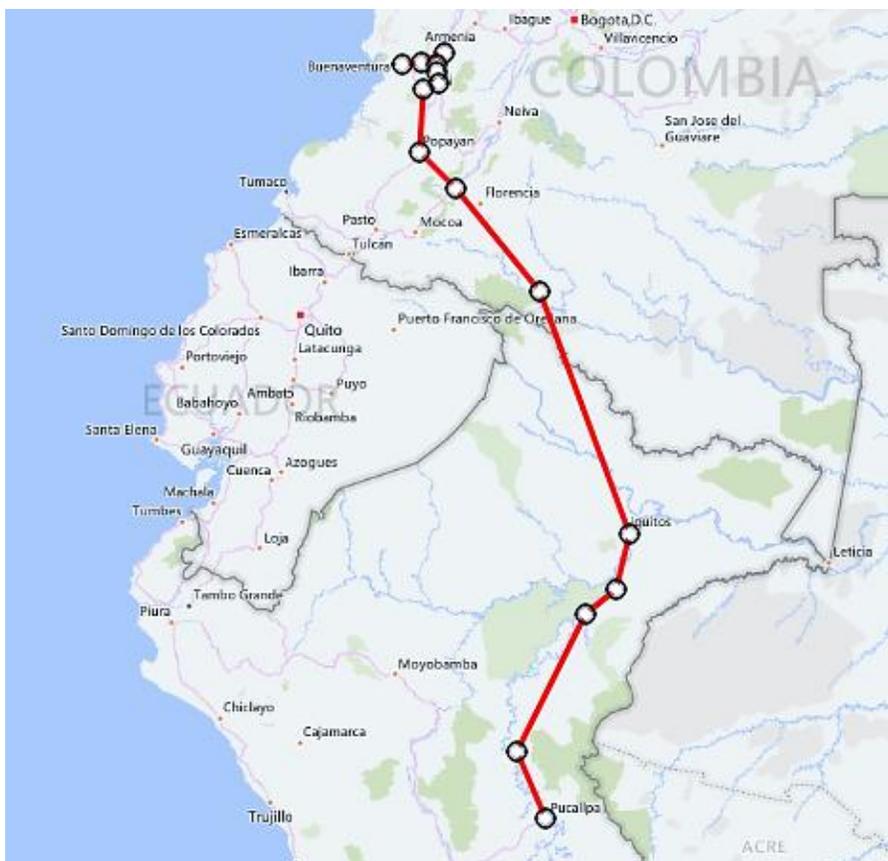
H: altura de circuitos

S: separación.

Para el desarrollo de este modelado en el software se ha tomado como referencia una futura línea desde Pucallpa hasta Buenaventura ubicados en los países de Perú y Colombia. (Vilcahuaman, Portal, Millan, Lozano, & Prado, 2023)

Figura 15

Resultados de la distancia de Pucallpa hasta buenaventura



Nota. <https://www.calcmaps.com/es/map-distance/>

Figura 16
Resultados de la potencia consumida

		2024	2044
Ciudad		Potencia Consumida Actual (MW)	Proyección a 20 años (MW)
COLOMBIA	Cali	650	1428
	Palmira	100	220
	Yumbo	120	263
	Jamundí	80	175
	Buenaventura	90	197
	Tuluá	60	131
	Buga	50	109
		1150	2523
PERÚ	IQUITOS	45.89	100.59
TOTAL		1195.89	2623.59

Nota. Elaboración propia

2.2.1 Preguntas de investigación:

¿De qué manera podemos demostrar el impacto ambiental del HVDC frente al HVAC en grandes distancias?

2. Resultados Encontrados

Figura 17

Resultados para las pérdidas resistivas y corona de línea de transmisión para subconductores AAAC de 1291mm²

```
Ingrese el Valor de la potencia máxima de la línea HVDC [MW]: 2623.59
Ingrese el Valor del voltaje de la línea HVDC [kV]: 500
Ingrese el Valor de la resistencia de la línea HVDC [ $\Omega$ /km]: 0.02582
Ingrese el Valor de la longitud de la línea HVDC [km]: 1676.63
Ingrese el Valor de la altura de los conductores [m]: 70
Ingrese el Valor de la separación de los polos [m]: 11.3
Ingrese el Valor del diametro de los subconductores [mm]: 46.75
Ingrese el Valor máximo del campo eléctrico de los conductores [kV/cm]: 30.82
Número de subconductores
2
3
4
Ingrese el número: 4
Las pérdidas resistivas son 148.99 MW
Las pérdidas por efecto cornona en buen tiempo 16.95 MW
Las pérdidas por efecto cornona en mal tiempo 50.16 MW
```

Nota. Elaboración propia

3. Análisis de las preguntas de investigación

Respecto al cuidado del medio ambiente se ha calculado las áreas cuadradas ocupadas entre el sistema de transmisión de corriente continua y alterna, usando las medidas del ancho mínimo establecidas sobre la faja de servidumbre ocupada mediante en la tabla 219 del código nacional de electricidad – suministro 2011 (CNE) para HVAC y IEEE para HVDC, teniendo como resultado una gran diferencia de área ocupada con ello podemos lograr entender el gran impacto positivo en la preservación del medio ambiente tanto en el presente como en el futuro, siendo de gran viabilidad una ejecución de proyecto entre Pucallpa y Buenaventura. Referente a las pérdidas resistivas y por efecto corona impactan en la eficiencia de las líneas HVDC, influyendo en el diseño y operación futuros. Además, se resalta la variabilidad significativa de las pérdidas por efecto corona según las condiciones climáticas, con pérdidas casi 6 veces mayores en mal tiempo. Se enfatiza la importancia del modelado y simulación detallados para comprender el comportamiento de las líneas HVDC, ofreciendo perspectivas valiosas para diseñadores y operadores como también hay un menor uso de espacios para su montaje frente a la corriente alterna HVAC. Finalmente, se plantean las posibles implicaciones de estos resultados en términos de estrategias de mitigación de pérdidas por efecto corona en futuros diseños de líneas HVDC y menor impacto al medio ambiente. (Reyes, 2019)

4. Conclusiones

- El sistema de transmisión en HVDC es muy importante su aplicación porque se encarga de usar menor área de terreno el cual ayuda en la preservación de la flora y fauna en el mundo, logrando ser una tecnología amigable con el medio ambiente tanto en el presente como en el futuro, esto es demostrado en el cálculo de diferencia de áreas cuadradas utilizadas por la franja de servidumbre siendo de 31.01 m².
- La transmisión en corriente continua es altamente eficiente en el transporte de energía porque mediante el uso del software de COMSOL Multiphysics y Matlab se demuestra la reducción de las pérdidas resistivas y por el efecto corona, siendo muy inferior al 3% de pérdidas a diferencia de la corriente alterna.
- Esta propuesta de investigación demuestra la viabilidad para su ejecución de un proyecto entre Pucallpa y Buenaventura porque demuestra la preservación de medio ambiente, bajas pérdidas de energía, bajos costos económicos de ejecución del proyecto a largo plazo y venta de energía al país de Colombia.

5. Referencias

- Michi, L., Donnini, G., Giordano, C., Scavo, F., Luciano, E. G., Aluisio, B., L'Abbate, A. (2019). New HVDC technology in Pan-European power system planning. (2019). IEEE.
- Canizal, J. (2022). Modeling and simulation of electrical power systems incorporating VSC-HVDC links for frequency control studies.
- Vilcahuaman, R., Portal E., Millan, F., Lozano, O., Prado, P. (2023). Cálculo de pérdidas en líneas de transmisión HVDC con Matlab y COMSOL multiphysics para la costa peruana. *CONEIMERA*.
- Reyes, D. (2019). *Analysis of an HVDC link with CSC technology during a three-phase fault*.
- Study Committe B4. (2019). VSC HVDC converters as virtual synchronous machine. *CICRÉ*, 3.
- Rueda García, M. (2023). *Evaluación Tecno-económica de una Interconexión HVDC entre Italia y España*. Sevilla: Universidad de Sevilla, Escuela Técnica Superior de Ingeniería.
- Morales Osorio, N., & Alarcón Gonzáles, M. (2020). *Corredores Híbridos para Líneas de Transmisión AC/DC*. Santiago de Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- García Aguilar, C. (2020). *Descripción y Estudio de los Enlaces HVDC en los Sistemas Eléctricos*. Escuela técnica superior de Ingeniería Industrial de Barcelona.

- Ferrada, A. (2020). Electromagnetic fields, corona effect and insulation coordination in HVDC. *CICRÉ*.
- X. Chen, H. Li, Y. Liang y G. Wang. (2020). A protection scheme for hybrid multi-terminal HVDC networks utilizing a time-domain transient voltage based on fault-blocking converters. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 118.
- Murillo, J. (2021). *Análisis de falla en DC en sistemas VSC-HVDC y sus impactos en sistemas AC*. Bogotá .
- Rodríguez Freire, I. (2016). *Direct Current Energy Transmission*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, Univ. de Cantabria.