

Estimation of electric fields in HVDC overhead lines for the future interconnection between Peru and Chile

Vilcahuaman- Sanabria, Raul¹, Maestro, Milan- Montalvo, Oner², Bachiller, Lozano-Flores, Fabricio², Bachiller, Prado-Zuta, Piero², Bachiller, Tabacchi-Murillo, Jesus¹, Doctor, Vallejos-Zuta, Alex¹, Maestro, Solis-Farfán, Roberto¹, Maestro

¹Universidad Nacional del Callao, Perú, revilcahuamansa@unac.edu.pe, jatabacchim@unac.edu.pe, aavallejosz@unac.edu.pe, resolisf@unac.edu.pe

²Universidad Tecnológica de Lima Sur, Perú, omillanm@untels.edu.pe, flozanof@untels.edu.pe, ppradoz@untels.edu.pe

Abstract– The objective of this research article is a simulation to measure the magnitude of electric fields, resistive losses and the corona effect, through the development of a set of numerical formulations in Comsol and a mathematical model in Matlab, generated around a transmission line 500KV HVDC. To carry out this simulation, the Comsol software was first used jointly, which considered the types of conductors, tension level, some beam geometries and a 2D model of the tower as a transmission line; and secondly, the Matlab software, where commands were used that are organized into groups of both input and output codes accompanied by the main factors that influence the generation of said losses. To carry out this research, articles from the IEEE, CIGRE, EPRI, among the main ones, were used. Therefore, these scientific contributions that help develop the technological system of the HVDC transmission system are of utmost importance.

Keywords-- HVDC, Comsol, Matlab, FEM.

Estimación de campos eléctricos en líneas aéreas HVDC para la futura interconexión entre Perú y Chile

Vilcahuaman- Sanabria, Raul¹, Doctor, Milan- Montalvo, Oner², Bachiller, Lozano-Flores, Fabricio², Bachiller, Prado-Zuta, Piero², Bachiller, Tabacchi-Murillo, Jesus¹, Doctor, Vallejos-Zuta, Alex¹, Maestro, Solis-Farfán, Roberto¹, Maestro

¹Universidad Nacional del Callao, Perú, revilcahuamansa@unac.edu.pe, jatabacchim@unac.edu.pe, aavallejosz@unac.edu.pe, resolisf@unac.edu.pe

²Universidad Tecnológica de Lima Sur, Perú, omillanm@untels.edu.pe, flozanof@untels.edu.pe, ppradoz@untels.edu.pe

Abstract– El objetivo de este artículo de investigación es una simulación para medir la magnitud de los campos eléctricos, las pérdidas resistivas y el efecto corona, a través del desarrollo de un conjunto de formulaciones numéricas en Comsol y un modelo matemático en Matlab, generados alrededor de una línea de transmisión 500KV HVDC. Para llevar a cabo esta simulación, en primer lugar se utilizó conjuntamente el software Comsol, que consideró los tipos de conductores, nivel de tensión, algunas geometrías de vigas y un modelo 2D de la torre como línea de transmisión; y en segundo lugar, el software Matlab, donde se utilizaron comandos organizados en grupos de códigos tanto de entrada como de salida acompañados de los principales factores que influyen en la generación de dichas pérdidas. Para llevar a cabo esta investigación se utilizaron artículos del IEEE, CIGRE, EPRI, entre los principales. Por lo tanto, estas contribuciones científicas que ayudan a desarrollar el sistema tecnológico del sistema de transmisión HVDC son de suma importancia.

Keywords-- HVDC, Comsol, Matlab, MEF.

I. INTRODUCCIÓN

El transporte de la electricidad a lo largo de su existencia ha logrado tener un proceso de evolución que ha sido fundamental para la conducción de suministro eléctrico desde las plantas generadoras hasta los puntos de distribución, a lo largo del tiempo el sistema transmisión de corriente directa de alta tensión, ha logrado convertirse en una excelente opción solo aplicada cuando cumpla con los siguientes factores como la capacidad de transferencia de energía, la longitud de la línea de transmisión, entre otras.

El desarrollo de la corriente directa inicio en el siglo XIX con Thomas Alva Edison que realizó la primera instalación de un sistema de iluminación en DC en New York, EE.UU. Sin embargo, había problemas de pérdidas eléctricas a largas distancias y funcionaba solo para baja tensión, logrando con el tiempo ser reemplazado por la corriente alterna de Nikola Tesla que tenía la ventaja de elevar y transmitir electricidad a grandes distancias. A lo largo del tiempo se logró determinar nuevas deficiencias con este tipo de energía eléctrica el cual tenía problemas que eran provocados por la potencia reactiva, formación de campos magnéticos, limitación para transporte submarino e inconvenientes con la instalación del cableado entre dos torres de muy alta tensión.

Sin embargo, se optó retomar las diferentes investigaciones en DC teniendo entre los más importantes avances tecnológicos como la válvula de vapor de mercurio de Hewitt y la válvula de

alta tensión por la empresa eléctrica Asea, que luego se fusionó con Brown Boveri para formar la empresa que actualmente se conoce como ABB. En el año de 1954 inició la construcción de la primera instalación de HVDC desde Gothland hacia el interior de Suecia. Además, en el año de 1957 se pudo determinar que las válvulas de mercurio tenían dificultades para la absorción completa de la tensión inversa por lo cual fue reemplazado; gracias a los circuitos electrónicos de la potencia, siendo los responsables de convertir la energía eléctrica de corriente alterna a corriente continua y viceversa. siendo el más resaltante entre ellos las válvulas de tiristores y convertidores IGBT, consiguiendo esta tecnología un sólido desarrollo y ejecución de proyectos en todo el mundo, en la actualidad a llegado a tener un gran reconocimiento por su eficiencia y seguridad.

II. MÉTODOS

A. Teoría de sistema de transmisión HVDC

La corriente directa de alta tensión o HVDC es un determinado sistema de transmisión de energía eléctrica utilizado principalmente para la transmisión de potencia a largas distancias como aéreo, subterráneo y submarino, conexión monopolar y bipolar, interconexión de redes asíncronas y control de flujo de potencia activa.

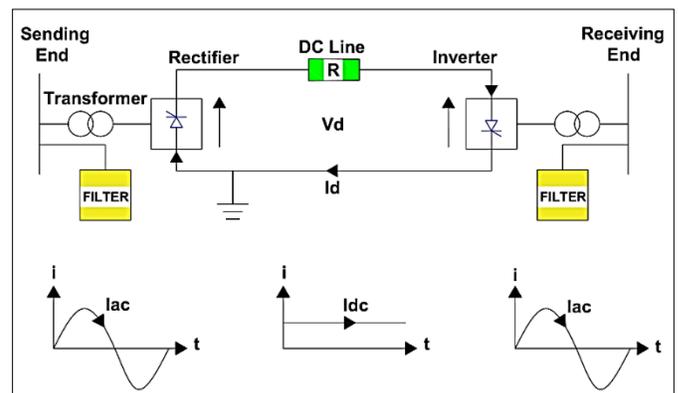


Fig 1. Esquema del sistema de transmisión HVDC

Fuente: Elaboración propia

Con respecto de la figura 1, vamos a calcular la intensidad de corriente directa (I_{dc}) para ello hacemos uso de la siguiente formula:

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

Tenemos:

- I_{dc} = Nivel de Flujo eléctrico a lo largo del conductor de transmisión DC.
- U_f = Nivel de tensión de salida con respecto al rectificador DC.
- U_i = Nivel de tensión de entrada del inversor DC.
- R = Resistencia de la línea de transmisión DC.

Tipos de conexiones

- Monopolar
- Bipolar
- Homopolar

Tipos de configuraciones

- Punto a punto
- Multiterminal
- Back_to_Back

Comparativo de las tecnologías HVDC y HVAC

En la siguiente figura se aprecian las diferencias entre las líneas de transmisión de HVAC y HVDC, ambas a 500 KV y 3000 MW

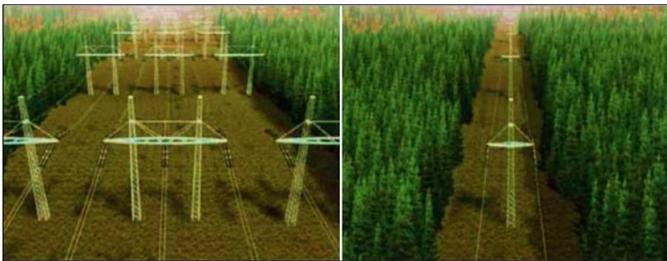


Fig 2. Comparación de líneas en el sector electricidad

Fuente: XXXX

Alternative	DC Alternatives				AC Alternatives		
	+ 500 Kv Bipole	2 x +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	3000	4000	3000	3000	3000	3000	3000
Rated Power (MW)							
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						

Notes:
 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

B. Estado del arte

Modelado y simulación de sistemas eléctricos de potencia incorporando enlaces VSC-HVDC para estudios de control de frecuencia:

La representación gráfica exhibe los componentes físicos característicos de una conexión VSC-HVDC punto a punto. La función principal de la estación rectificadora VSC es transformar la tensión de corriente alterna (CA) en tensión de corriente continua (CC), donde la corriente se transfiere a través del conductor y se completa el proceso inverso en el extremo opuesto. Para adaptar la tensión de corriente alterna a los niveles requeridos, se utilizan filtros de CA y transformadores OLTC ajustables. Se utiliza un reactor en serie en la red de CC, esta asume múltiples funciones críticas, como la mitigación de irregularidades de corriente, la reducción de errores de corriente y la prevención de resonancias no deseadas. Además, HVDC utilizan conjuntos de capacitores cuya función es almacenar y liberar según la dirección del flujo eléctrico para mantener el equilibrio de corriente y predeterminedar la potencia en el enlace de CC. En la figura, se identifican las dos estaciones VSC mediante subíndices 'i' y 'r', correspondientes a estación inversora y rectificadora, respectivamente. En el análisis de Corriente Alterna Fundamentada (CAF), se adoptan parámetros de sistema VSC-HVDC más simples, que contienen el comportamiento del circuito AC/DC en condiciones estáticas y dinámicas REF

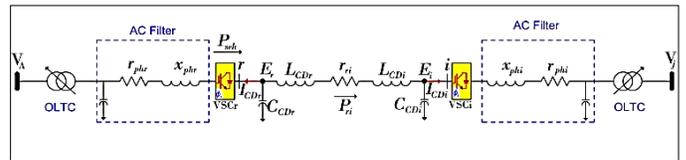


Fig 3. Enlace VSC-HVDC

Fuente: Elaboración propia

Análisis de un enlace HVDC con tecnología CSC durante una falla trifásica.

Por lo general, el convertidor está controlado por un pulso de disparo de tiristor. En un convertidor de seis pulsos, la unidad elemental del sistema HVDC CSC se encuentra conectado en cortocircuito en el lado de corriente continua como se ilustra en el diagrama. Si el cortocircuito de línea a línea se encuentra directamente entre los terminales (RDC = 0, LDC = 0), es probable que el puente produzca la mayor corriente de falla. En este caso particular, el flujo eléctrico de falla de CC se puede deducir de acuerdo con los bucles I y II que se muestran en la figura anterior. En este momento los diodos D1, D2 y D3 están encendidos. donde Ik1 es la corriente de cortocircuito en el momento de la maniobra. REF

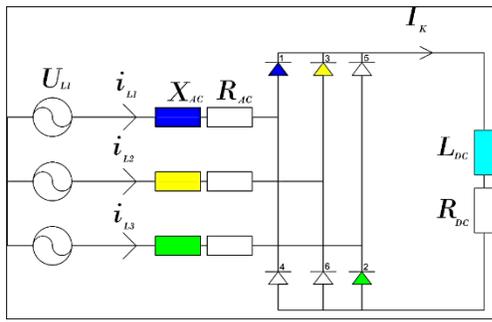


Fig 3. Enlace SCC-HVDC
Fuente: Elaboración propia

C. Estudio de mercado

El consumo eléctrico en Chile tanto renovable como no renovable sigue aumentando principalmente en Tarapacá, Antofagasta y Atacama teniendo un consumo eléctrico promedio total de 18.1 TWh en estos últimos años; este resultado se debe a la gran demanda energética de las empresas mineras principalmente de cobre, oro y hierro. Está conformado por una variedad de procesos de su producción por ejemplo Absorción de agua del mar, servicios, lixiviación, refinería, fundición, concentradora, entre otros; por consiguiente, que crean grandes consumos de energía, se ha tomado como prioridad generar e importar mayor energía de fuentes renovables que en la actualidad solo representa el 44%.

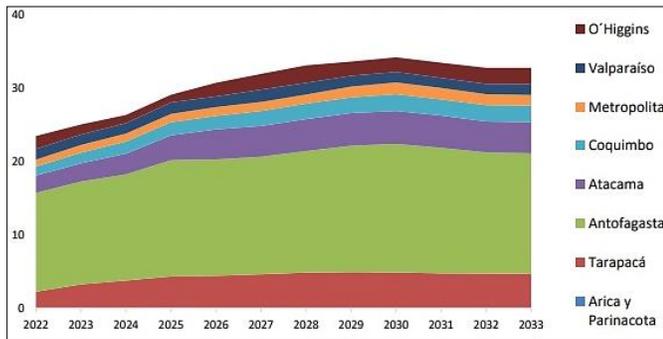


Fig 3. Consumo eléctrico (%) esperado por región en la minería del cobre 2021 y 2032
Fuente: REF

Para esta investigación se utilizarán dos programas en conjunto los cuales es el COMSOL Multiphysics para la solución de ecuaciones diferenciales mediante el método de elementos finitos y el otro es el MATLAB para manejar la codificación de ecuaciones, entradas y salidas.

Las principales variables descritas son S_m que es la potencia máxima que envía la línea HVDC en MW, la siguiente es U que sería el voltaje bipolar de las líneas que está escrito antes con símbolo \pm , como $\pm 1000 \text{ kV}$, R que es la resistencia lineal de la línea en ohms/km, no se considera inductancia o capacitancia por ser una red DC, L es la distancia tendida del conductor de transmisión en km, d es el diámetro de los subconductores por cada circuito y la línea HVDC.

El valor g que es el campo eléctrico de los subconductores se calcula mediante el método de los elementos

finitos en COMSOL Multiphysics ya que se considerarán la influencia tanto del aire y sobre todo la intervención en que la estructura metálica de la torre de transmisión está conectada directamente a tierra, solo que por las distancias entre los subconductores y la torre se optó por simplificar la estructura de la torre en elementos 1D.

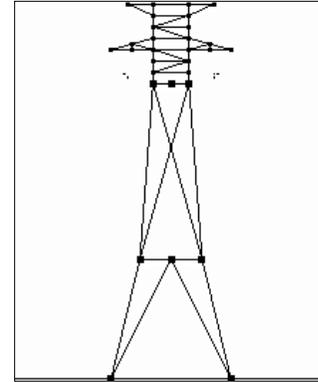


Fig 3. Recreación de estructura de torre con elementos 1D en COMSOL Multiphysics
Fuente: Elaboración propia

Lo siguiente es recrear las propiedades de los materiales que sería aluminio para el caso de los subconductores y aire para todo lo demás, los elementos 1D no presentan dicha propiedad, también cabe recalcar que los subconductores no están modelados como puntos si no que por temas de escalas son parecidos a cargas puntuales. Luego se selecciona el módulo de cálculo "Electrostatic" para trabajar con las siguientes ecuaciones.

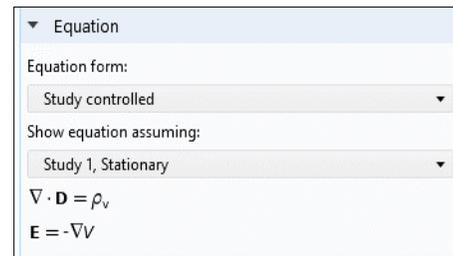


Fig 3. Ecuaciones electrostáticas utilizadas para resolver el modelo en COMSOL
Fuente: Elaboración propia (Recuperado de la interfaz del programa COMSOL Multiphysics)

Donde $\nabla \cdot \mathbf{D}$ es el gradiente del campo de desplazamiento eléctrico que es igual a la densidad de la carga de dicho elemento siendo equivalente a la carga ρ_v por la ley de Gauss mientras que \mathbf{E} corresponde al campo eléctrico resultante del gradiente del voltaje V .

Las condiciones son principalmente asignar a todo el contorno de la torre de transmisión como $V=0$ y a todos los contornos externos de los conductores de aluminio un voltaje de $+V$ a la derecha y $-V$ a todos los subconductores de la izquierda.

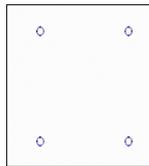


Fig 3. Contornos para las condiciones de +V en subconductores de la derecha

Fuente: Elaboración propia

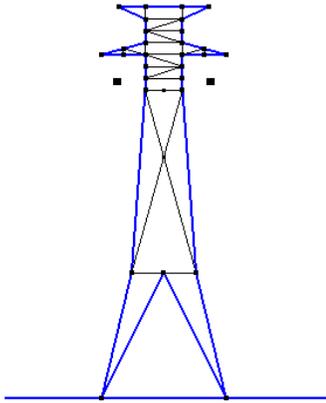


Fig 3. Contornos para las condiciones de V=0 en contorno de torre de transmisión

Fuente: Elaboración propia

Luego para la resolución se optó por utilizar un refinamiento de malla para llegar a puntos de convergencia, a continuación, se muestra las mallas generadas en la iteración n=0, la creada por defecto por COMSOL, y n=5, donde esta última utiliza más de 500 000 elementos.

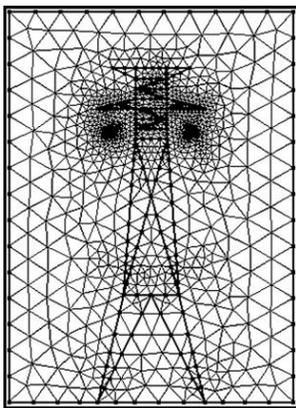


Fig 3. Malla inicial generada por COMSOL n=0

Fuente: Elaboración propia

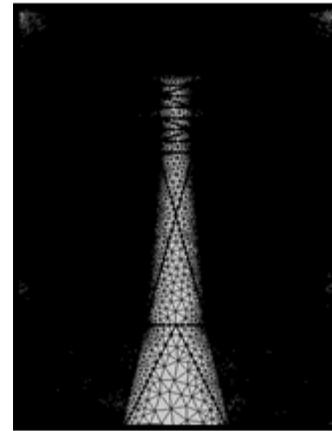


Fig 3. Malla final generada por COMSOL n=7

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, cuando el valor de g converge se toma identificando el valor máximo del campo eléctrico.

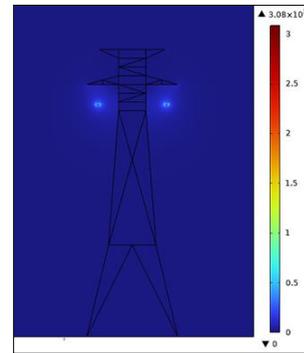


Fig 3. Resultados finales para el campo eléctrico en kV/m para subconductores AAAC de 1291mm²

Fuente: Elaboración propia

Para el caso de COMSOL las unidades más similares a kV/cm son el kV/m que simplemente se debe dividir entre 100, en el caso de la Figura 11 sería 22.40 kV/cm. Y así es como finalmente se obtiene el valor de g con la influencia no solo de la altura y la distancia, como se calcula usualmente, sino también de la estructura metálica.

Finalmente, las ecuaciones para las pérdidas, comenzando con las pérdidas resistivas que solo se derivan de fórmulas elementales son:

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

Donde P_{RL} es la pérdida resistiva en Watts y que ya al momento de arrojar la salida de convierte a MW por un factor de 10^{-6} .

REF

Para el caso de las pérdidas por el efecto corona si se deben basar los cálculos en los documentos de CIGREE y estas se dividen en mal y buen clima que explicado de manera sencilla en el primer caso es cuando llueve y cuando no. Las fórmulas son logarítmicas para aproximarlas a casos ya

existentes y están completas en el código de Matlab donde se convierten de dB a W y luego a MW.

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

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

Donde P_{bt} y P_{mt} son las pérdidas para el buen y mal tiempo en dB, son d y d_0 diámetros de los subconductores n y n_0 son su cantidad por circuito, H es la altura de los circuitos y S su separación. Los valores base son los siguientes:

- $P_0 = 2.9 \text{ dB (buen tiempo), } 11 \text{ dB (mal tiempo)}$
- $d_0 = 35 \text{ mm}$
- $g_0 = 25 \text{ kV/cm}$
- $n_0 = 3$
- $H_0 = 15 \text{ m}$
- $S_0 = 15 \text{ m}$

I.CASO EJEMPLO

Los datos correspondientes a la futura línea de transmisión HVDC incluyen una potencia máxima de 1500 MW, una tensión de 500 kV, una resistencia de línea de 0.02582 Ω/km, una longitud de 725 km, una altura de los conductores de 38 m, una separación de polos de 11.3 m, un radio de los subconductores de 23.375 mm y una distancia de separación de los subconductores de 450 mm, con un total de 2 conductores. La geometría y el cálculo del valor máximo del campo eléctrico alrededor de los conductores se presentan en la siguiente imagen, donde se observa un valor máximo de 30.82 kV/cm. Al ingresar estos valores en MATLAB, se obtienen los resultados que se detallan a continuación.

Figura 1

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

```
Ingrese el Valor de la potencia máxima de la línea HVDC [MW]: 1500
Ingrese el Valor del voltaje de la línea HVDC [kV]: 500
Ingrese el Valor de la resistencia de la línea HVDC [Ω/km]: 0.02582
Ingrese el Valor de la longitud de la línea HVDC [km]: 725
Ingrese el Valor de la altura de los conductores [m]: 38
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: 2
Las pérdidas resistivas son 42.12 MW
Las pérdidas por efecto corona en buen tiempo 3.38 MW
Las pérdidas por efecto corona en mal tiempo 14.13 MW
```

Nota. Elaboración propia

De los que se observa que las pérdidas resistivas para los subconductores de 1291 mm² son del 2.8% de la potencia transmitida mientras que las pérdidas en buen tiempo representan un 0.2% de las pérdidas, sin embargo, en mal tiempo estas son más de 4 veces mayores comparadas en buen tiempo con un 0.9%.

II.DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En primer lugar, se destaca cómo las pérdidas resistivas y por efecto corona impactan 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. 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.

Conclusiones

Este trabajo de investigación ha culminado en la creación exitosa de un modelo computacional utilizando el software Matlab y Comsol Multiphysics, con el propósito de calcular las pérdidas resistivas y por efecto corona, siendo de gran importancia porque nos ayuda a minimizar las pérdidas de potencia y energía. La implementación de esta simulación involucró la división de la tarea en segmentos que incluyeron código y datos extraídos de una sección de la futura línea de transmisión HVDC desde Perú hacia Chile. Estos cálculos se realizaron de forma rápida y precisa a diferencia de otras metodologías es más replicable por su código abierto.

En el aspecto económico se puede ver que los sistemas de transmisión HVDC son más rentables, eficientes y seguros a diferencia de HVAC. Es por eso que, sería una excelente opción que se lleve a cabo este proyecto desde Moquegua hasta Antofagasta por la gran demanda y costo energético que existe en las principales mineras de Chile.

Dada la posibilidad de ejecutar este proyecto se prevé vender energía eléctrica de calidad en corriente continua a las mineras de Tarapacá, Antofagasta y Atacama con una cantidad de 1 600 MW siendo aproximadamente dentro de 10 años. Además, el país de Chile esta interconectado con Argentina en la subestación de potencia Alto Jahuel dentro de 15 años hay la posibilidad de exportar 1 500 MW adicionales.

Teniendo en cuenta que la tecnología de HVDC en su proceso de instalación ocupa menos espacio a comparación de la HVAC esta nueva tecnología nos permite reducir el impacto ambiental.

Agradecimiento

Reconocimiento a la Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur (UNTELS) como a la facultad de ingeniería y gestión, por su apoyo para el desarrollo del artículo de investigación.

ACKNOWLEDGMENT

The preferred spelling of the word “acknowledgment” in America is without an “e” after the “g.” Try to avoid the stilted expression, “One of us (R. B. G.) thanks ...” Instead, try “R.B.G. thanks ...” Put sponsor acknowledgments in the unnumbered footnote on the first page.

REFERENCES

- [1] Manuscript Templates for Conference Proceedings, IEEE. http://www.ieee.org/conferences_events/conferences/publishing/templates.html
- [2] M. King, B. Zhu, and S. Tang, “Optimal path planning,” *Mobile Robots*, vol. 8, no. 2, pp. 520-531, March 2001.
- [3] H. Simpson, *Dumb Robots*, 3rd ed., Springfield: UOS Press, 2004, pp.6-9.
- [4] M. King and B. Zhu, “Gaming strategies,” in Path Planning to the West, vol. II, S. Tang and M. King, Eds. Xian: Jiaoda Press, 1998, pp. 158-176.
- [5] B. Simpson, et al, “Title of paper goes here if known,” unpublished.
- [6] J.-G. Lu, “Title of paper with only the first word capitalized,” *J. Name Stand. Abbrev.*, in press.
- [7] Y. Yorozu, M. Hirano, K. Oka, and Y. Tagawa, “Electron spectroscopy studies on magneto-optical media and plastic substrate interface,” *IEEE Translated J. Magn. Japan*, vol. 2, pp. 740-741, August 1987 [*Digest 9th Annual Conf. Magnetism Japan*, p. 301, 1982].
- [8] M. Young, *The Technical Writer’s Handbook*, Mill Valley, CA: University Science, 1989.