

Evaluación de la estabilidad del sistema de transmisión eléctrica a partir de estructuras simétricas considerando transferencia de carga

Evaluation of the stability of the electrical transmission system from symmetric structures considering load transfer

Saúl Mauricio Jami Solís¹

¹ Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador

*Autor de correspondencia: sjamis@est.ups.edu.ec

RESUMEN— Este artículo propone un análisis de la geometría de las líneas de transmisión, basado en comparaciones de diferentes geometrías, que se proponen para analizar qué sistema es el más óptimo para su posible implementación, lo que permite introducir criterios de construcción y diseños apropiados en las líneas de transmisión, dependiendo del calibre de los conductores y las distancias entre las líneas, según las curvas de capacidad de carga de St.Clair, que ofrecen una forma sencilla de visualizar la capacidad de transferencia de energía de las líneas eléctricas. transmisión. Hay una serie de agentes o componentes que condicionan la capacidad de las líneas de transmisión, algunos de estos se discuten desde un punto de vista práctico, como la estabilidad para líneas de más de 80 km, hay varias publicaciones que se refieren a este tema, que analiza todos los aspectos del problema de estabilidad en las líneas de transmisión, lo que significa en la práctica que la línea de transmisión es esencialmente una reactancia, un punto de referencia que se ha estructurado para este tipo de análisis de una impedancia de aumento (SIL) de uno, para un convencional línea de 480 km, operando a una frecuencia de 60 Hz.

Palabras clave— Capacidad de transferencia de línea, carga de impedancia de sobretensión, curva de St. Clair, límite de estabilidad.

ABSTRACT— This article proposes an analysis of the geometry of the transmission lines, based on comparisons of different geometries, which are proposed to analyze which system is the most optimal for its possible implementation, which allows to introduce construction criteria and appropriate designs in the transmission lines, depending on the caliber of the conductors and the distances between the lines, based on the St.Clair chargeability curves, which makes available a simple way to visualize the energy transfer capacity of the power lines. transmission. There are a number of agents or components that condition the capacity of transmission lines, some of these are discussed from a practical point of view, such as stability for lines of more than 80 km, there are several publications that refer to this issue, which analyzes all aspects of the stability problem in the transmission lines, which means in practice that the transmission line is essentially a reactance, a reference point that has been structured for this type of analysis of an increase impedance (SIL) of one, for a conventional line of 480 km, operating at a frequency of 60 Hz.

Keywords— Line transfer capacity, surge impedance load, St. Clair curve, stability limit.

1. Introducción

Existen factores que restringen las capacidades de una línea de transmisión el más relevante es el nivel existente de voltaje. Otro parámetro importante es la geometría de las líneas de transmisión utilizado para transportar eficientemente la energía desde un punto a otro y tienen un efecto sobre la amplitud de las sobretensiones [1], [2]

Posteriormente en 1953 H.P. Saint Clair introdujo su conocida curva de carga de línea de transmisión, potencia

transferida versus longitud de la línea, expresadas en términos en por unidad de su SIL (Surge Impedance Loading) o potencia natural de la línea. [3] El valor del SIL depende tanto de la inductancia serie y la capacitancia en derivación como del nivel de tensión entre fases de la línea de transmisión.

En [4] los autores proponen analizar líneas de longitudes largas basándose en un análisis de redes de corriente alterna y algunas deducciones matemáticas

Citación: S.Jami, "Evaluación de la estabilidad del sistema de transmisión eléctrica a partir de estructuras simétricas considerando transferencia de carga.", *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 16, no. 2, pp. (no modificar), 2020.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 20 de enero de 2020. **Recibido con correcciones:** 25 de marzo de 2020. **Aceptado:** 12 de julio de 2020.

DOI.

Copyright: 2020 S. Jami. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

formuladas en por unidad y con una potencia base igual al cuadrado del voltaje de la línea [5]. Además de este análisis se dedujo la importancia de la estabilidad como uno de los factores limitantes para la transferencia de potencia la cual debía ser tomada en cuenta para el sistema de potencia [6].

En los últimos años, la estabilidad del voltaje del sistema de potencia ha inclinado considerable interés en las fábricas, por lo tanto, es trascendental introducir la estabilidad de voltaje en la curva de capacidad de carga de línea [7].

En [8] los autores realizan una crítica acerca del problema de estabilidad en una línea de transmisión que es esencialmente una reactancia y como tal requiere un voltaje de capacidad de St.Clair y rendimiento de las líneas de transmisión para provocar flujo de poder sobre la línea considerando además los generadores ya que estos agregan más o menos reactancia a la línea.6

En [9] los autores usas la curva de St. Clair para estimar la capacidad de carga máxima de una línea de transmisión teniendo en cuenta tres causas principales, limitaciones térmicas, caída de voltaje y estabilidad en una relación simple, la cual permite ver el valor máximo de capacidad para estimar líneas paralelas a diferentes niveles de voltaje.

En [10], [11] despliegan las curvas de cargabilidad de la línea de transmisión considerando diferentes factores como alta temperatura, alta radiación solar, baja velocidad del viento, la longitud máxima de las líneas, resistencia y potencia reactiva y por otros factores. La curva original de St. Clair suponía que la línea de transmisión no tenía pérdidas y que no había potencia reactiva en el sistema.

Es importante mencionar que la curva de cargabilidad no reemplaza la necesidad de efectuar estudios detallados de flujo de potencia y estabilidad de los sistemas eléctricos de potencia debido al aumento de la carga de las líneas de transmisión, el problema de estabilidad de voltaje se ha convertido en un problema critico [12].

Otro problema para la estabilidad del sistema son las estructuras ya que son un aspecto vital para el monitoreo de las líneas de transmisión. En [13] presenta un método novedoso para evaluar el estado estructural de la línea de transmisión basado en análisis dinámico y de estabilidad.

El fin de la investigación es realizar un estudio sobre la geometría de las líneas de transmisión en el Ecuador, para mejorar y asegurar que las líneas de transmisión

transferieran la potencia y energía de una manera segura, y con el mínimo porcentaje de perdidas, mejorando el comportamiento del sistema. En la estimación de la estabilidad del voltaje a lo largo del sistema de transmisión y de distribución se realiza un estudio para estimar los márgenes de carga [14]. Para lo cual se emplea la curva de St. Clair que es ampliamente utiliza para el desarrollo de guías sobre las capacidades de poder transmitir potencia mediante las líneas de transmisión y para una correcta planificación preliminar del sistema de transmisión [15].

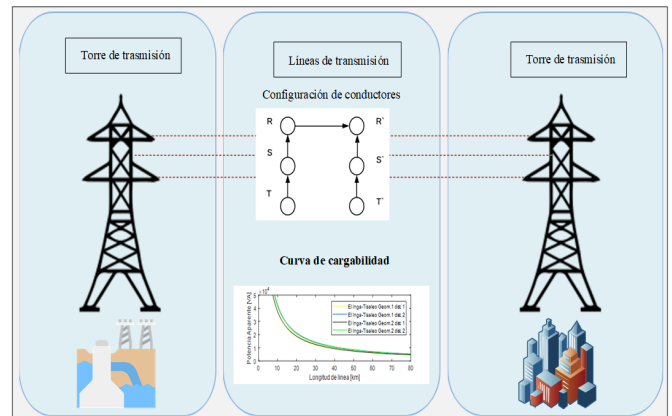


Figura 1. Estudio de transferencia de potencia en líneas de transmisión.

La figura 1 representa el modo de evaluar la transmisión de potencia en las líneas aéreas del sistema de transmisión, para diferentes modelos geométricos.

El diseño se basa en construir las curvas de cargabilidad para diferentes configuraciones geométricas y diferentes longitudes de transmisión para evaluar la estabilidad del sistema.

2. Curva de cargabilidad en líneas de transmisión

La curva de cargabilidad enlaza la longitud de las líneas de transmisión y la potencia de carga que circula por la misma, este tipo de análisis se puede tener varios aspectos que afectan a la capacidad de transferencia de energía por las líneas de transmisión que son los primeros en tomar en cuenta para la planificación de nuevos sistemas que entren en operación, como nivel de tensión, configuración geométrica de conductores, número de conductores por fase, separación entre conductores y calibre de conductores [11], [12].

La estabilidad en un sistema es una condición de igualdad entre las fuerzas de oposición. Si una perturbación produce un desequilibrio sostenido entre las fuerzas de oposición, se presenta la condición de inestabilidad, que se manifiesta de varias maneras. En un Sistema eléctrico de potencia (SEP) puede presentar cómo la pérdida de sincronismo u oscilaciones de magnitud creciente, el estudio de estabilidad se lo realiza con el fin de mejorar la firmeza del sistema.

3. Cargabilidad en sistemas eléctricos de potencia

La interpretación de la cargabilidad de una línea de transmisión real se puede simplificar al considerar en primer lugar el comportamiento de una línea de transmisión sin pérdidas para ello se introduce el concepto de impedancia característica [9].

4. Parámetros longitudinales y transversales

Las líneas de transmisión están caracterizadas por parámetros longitudinales y transversales.

A. Longitudinales

Resistencia Serie (R). - La resistencia se caracteriza por presentar una densidad de corriente distribuida a lo largo de su sección transversal (conductor) y se la puede hallar mediante la siguiente expresión [16]:

Para temperaturas iguales a 20°C:

$$R=(\rho * \text{Long}) / A \quad [\Omega] \quad (1)$$

Dónde:

ρ .- Resistividad del material conductor a 20 °C. [$\Omega * \text{mm}^2/\text{m}$]

Long.- Longitud del conductor. [m]

A.- Sección transversal del conductor. [mm^2]

Para temperaturas diferentes a 20 °C:

$$R_T=(\rho_{(20^\circ\text{C})}+\rho_{(20^\circ\text{C})}*\alpha(T-20^\circ\text{C})) \text{ Long}/A*n \quad (2)$$

[Ω]

Donde:

ρ (20°C). - Resistividad del material conductor 20°C. [$\Omega * \text{mm}^2/\text{m}$]

α .- Coeficiente térmico del conductor. [$1/^\circ\text{C}$].

T.- Temperatura del conductor. [$^\circ\text{C}$]

Long.- Longitud del conductor. [m]

A.- Sección transversal del conductor. [mm^2]

n.- número de conductores por fase.

Inductancia serie(L). - La inductancia de línea depende de los acoplamientos de flujo parciales dentro del corte transversal de conductor y acoplamientos de flujo externos, al igual que depende de la geometría del sistema de transmisión. Se la puede hallar mediante la siguiente expresión: [17][18]

$$L=(u/(2*n)+2*\ln(\text{DMG}/\text{RMG}))*10^{-4}*\text{Long} \quad [\text{H}] \quad (3)$$

Dónde:

u.- Coeficiente de permeabilidad del conductor.

n.- Número de conductores por fase.

DMG.- Distancia media geométrica [m].

RMG.-Radio medio geométrico [m].

Long.- Longitud del conductor [km].

B. Transversales

Capacitancia en paralelo. - La diferencia de potencial entre los conductores de una línea de transmisión provoca que los conductores se carguen; la carga por unidad de diferencia de potencial es la capacitancia entre conductores [19][20].

Se la puede hallar mediante la siguiente expresión:

$$C=(24,2*10^{-4})/\log_{10}(\text{DMG}/\text{RMG}) * \text{Long} \quad [\text{F}] \quad (4)$$

Dónde:

DMG.- Distancia media geométrica. [m]

RMG.-Radio medio geométrico. [m]

Long.- Longitud del conductor. [km]

Surge Impedance Loading. - Ya que G es despreciable y R es pequeña, se asume que las líneas de alto voltaje no tienen pérdidas cuando tratan con rayos y picos de conmutación. Por tanto, la impedancia característica Z_c con pérdidas despreciables es comúnmente referida como la impedancia de incremento (surge impedance), y sus dimensiones son de una resistencia pura. La potencia entregada por una línea de transmisión cuando es determinada por su surge impedance es conocida como Surge Impedance Loading[21], [22].

$$\text{SIL}=(V_0)^2/Z_c \quad [\text{W}] \quad (5)$$

Dónde:

V_0 . - Voltaje nominal de la línea. [V]

Z_c . - Impedancia característica de la línea. [Ω]

El valor del SIL depende tanto de la inductancia serie y la capacitancia en derivación como del nivel de tensión entre fases de la línea de transmisión, como se indica en la ecuación 5. Cuanto mayor es el nivel de tensión mayor es el SIL de la línea. De igual manera, el SIL aumenta al incrementar el número de conductores por fase de la línea, ya que, disminuye su impedancia característica [15].

$$Z_c = \sqrt{L/C} \quad (6)$$

Dónde:

L.- Inductancia en serie.

C.- Capacitancia en paralelo.

5. Clasificación de las líneas

Las líneas aéreas se pueden clasificar por su longitud, basados en las aproximaciones justificadas en su modelamiento:

A. *Líneas Cortas.* –

Líneas menores a 80km. Su capacitancia es despreciable y puede ser representada por sus impedancias en serie.

B. *Líneas Medias.* –

Líneas con longitud entre 80 y 200km. Pueden ser representadas por el circuito equivalente nominal π .

C. *Líneas Largas.* -

Líneas mayores a 200km. Para dichas líneas los efectos distribuidos de los parámetros son significantes. Estos necesitan ser representados por su circuito π equivalente.

Máxima capacidad de transferencia. - es calculada al multiplicar el coeficiente de St. Clair por el SIL. El coeficiente de ST. Clair solo depende de la longitud de la línea [23], [24], [25], [26].

$$P_{\text{line}} = c(l) * SIL \text{ [W]} \quad (7)$$

Donde:

c(l). - Coeficiente de St. Clair.

SIL. - Surge Impedance Loading. [W].

Tabla 1. Especificaciones de las variables utilizadas

Variable	Especificación	Unidades de medida
R	Resistencia Serie	Ω
P	Resistividad del material conductor	$\Omega * \text{mm}^2/\text{m}$
Long	Longitud del conductor	Metros

A	Sección transversal del conductor	mm ²
n	número de conductores por fase	
L	Inductancia	Henrios
U	Coefficiente de permeabilidad del conductor	
DMG	Distancia media geométrica	metros
RMG	Radio medio geométrico	metros
C	Capacitancia	Faradios
SIL	Surge Impedance Loading	W
Vo	Voltaje nominal de la línea	V
Zc	Impedancia característica de la línea	Ω
P_line	Potencia de la línea	W
c(l)	Coeficiente de St. Clair	

6. Formulación del problema

En este contexto se percibe, evaluar la transmisión de potencia en las líneas aéreas del sistema de transmisión en el Ecuador para diferentes modelos geométricos que se proponen para analizar qué sistema es el óptimo para su posible implementación, comparándola con el sistema implementado actualmente por los organismos de regulación vigentes en el país.

El procedimiento adoptado para la investigación permite obtener los valores teóricos reales de los elementos longitudinales y transversales presentes en las líneas de transmisión, ya que de estos valores depende tanto el funcionamiento como el comportamiento del sistema, tratando así de reducir en lo posible la Potencia Reactiva (Q), que generan las líneas de transmisión ya que esta se ve representada como una pérdida en el sistema ya que el sistema es de corriente alterna y las reactancias capacitivas e inductivas producen este tipo de fenómenos.

La investigación se llevará a cabo en líneas de alta tensión específicamente en líneas de 500 y 230 kV, con líneas de transmisión cortas, medias y largas desde 5 km hasta 174 km, y todas las especificaciones de los sistemas proporcionadas por la Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC EP) que se pueden observar en la tabla 2, cabe especificar que el conductor a ser utilizado será Acar Aluminium Alloy Reinforced Conductor de 560 mm².

Tabla 2. Especificaciones técnicas de los sistemas de transmisión del Ecuador

Línea de transmisión	Voltaje (kv)	Longitud (km)	n (por fase)	Líneas	Circuito
Inga-San Rafael C.C Sinclair	500	126	4	2	Simple
San Rafael-Jivino	230	90	2	1	Doble
Jivino-Shushufindi	230	30	2	1	Doble
El Inga-Tisaleo	500	137	3	1	Simple
Tisaleo-Totoras	230	13	2	1	Doble
Tisaleo-Chorilloo	500	174	3	1	Simple
Chorillo-Pascuales	230	5	1	3	Doble

Los datos de la tabla 2, serán utilizados dentro del algoritmo genérico, que se desarrolló específicamente para esta investigación el cual generara las curvas de cargabilidad de St.Clair, las cuales serán aprovechadas para determinar qué sistema es el ideal para su implementación dentro del país.

Los conductores están soportados en estructuras metálicas de tipo cabeza de gato, en configuración horizontal.

7. Algoritmo para el estudio de cargabilidad en líneas de transmisión

Algoritmo 1. Cargabilidad de líneas de transmisión.

- 1: Paso 1: Declaración de los parámetros del sistema de potencia.
- 2: Paso2: Hacer mientras i sea menor o igual a longitud
- 3: Paso 3: COMPROBAR CONDICIONAL.
- 4: Si longitud ≤ 80
- 5: Si longitud >80 y longitud ≤ 200
- 6: Si longitud >200
- 7: Paso 4: RESOLVER ECUACIONES.
- 8: $R=(\rho * Long) / A$.
- 9: ρ .- Resistividad del material conductor
- 10: Long. - Longitud del conductor.
- 11: Paso 5:
- 12: $L=(u/(2*n) + 2*\ln(DMG/RMG))*10^{-4}*Long$
- 13: A.- Sección del conductor
- 14: u.- Coeficiente de permeabilidad del conductor.
- 15: n.- Número de conductores por fase
- 16: Paso 6:
- 17: $C=(24,2*10^{-4})/\log_{10}(DMG/RMG) * Long$
- 18: DMG. - Distancia media geométrica.
- 19: RMG. -Radio medio geométrico.

20: Paso 7:

21: $SIL=(V_0)^2/Z_c$

22: V_0 . - Voltaje nominal de la línea.

23: Z_c . - Impedancia característica de la línea.

24: Paso 8:

25: $P_{line}=c(l)*SIL$

26: $c(l)$. - Coeficiente de St. Clair.

27: SIL. - Surge Impedance Loading

28: Paso 9: Finalizar contador i

29: Paso 10: Finalizar hacer mientras

Se procede a realizar las curvas de Potencia vs la longitud de las líneas.

Una vez encontrado los parámetros longitudinales y transversales de las líneas dependiendo del tipo de línea que se esté trabajando. Validar el funcionamiento de los valores simulados y el sistema real basándose en la comprobación de fallas del modelo y en trabajos relacionados para realizar un análisis de las gráficas resultantes con los índices obtenidos.

8. Análisis y resultados.

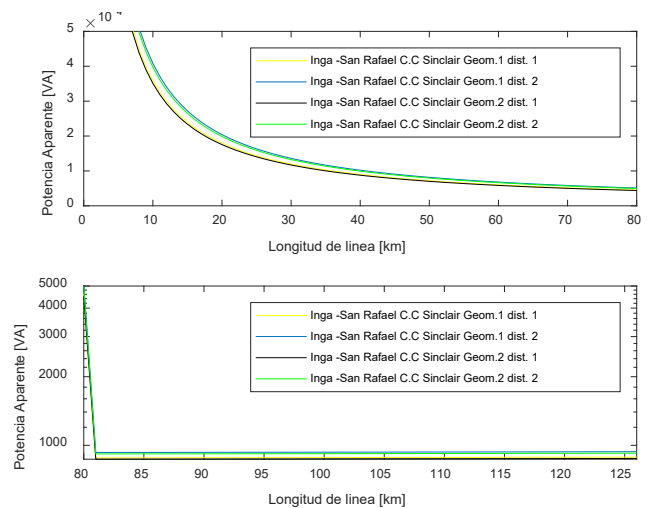


Figura 2. Resultados de la geometría de prueba 1 con las distancias de la tabla 2.

Como se aprecia en la figura 2, la línea de transmisión Inga a San Rafael, en cualquiera de las dos geometrías y a diferentes distancias la potencia aparente comienza en 50 KVA, y tiende a estabilizarse en los 70km, a partir de los 80km comienza una longitud mediana y provoca una caída de potencia aparente de una manera brusca, ese efecto se produce hasta estabilizarse en una longitud de

línea de 85km.

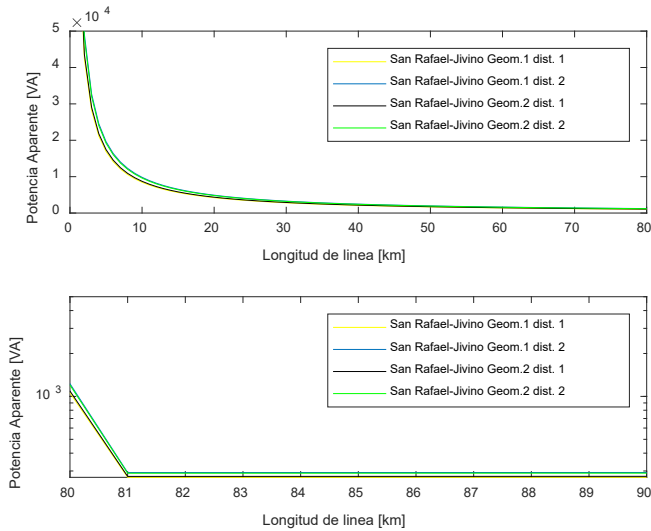


Figura 3. Resultados de la geometría de prueba 1 con las distancias de la tabla 2.

Como se aprecia en la figura 3, la línea de transmisión San Rafaela Jivino, en cualquiera de las dos geometrías y a diferentes distancias la potencia aparente comienza en 50 KVA, y tiende a estabilizarse a los 70 Km, a partir de los 80Km hasta los 81Km es decir en una longitud mediana, provoca una caída de potencia aparente de una manera más brusca y prolongada, ese efecto se produce hasta estabilizarse en una longitud de línea mediana.

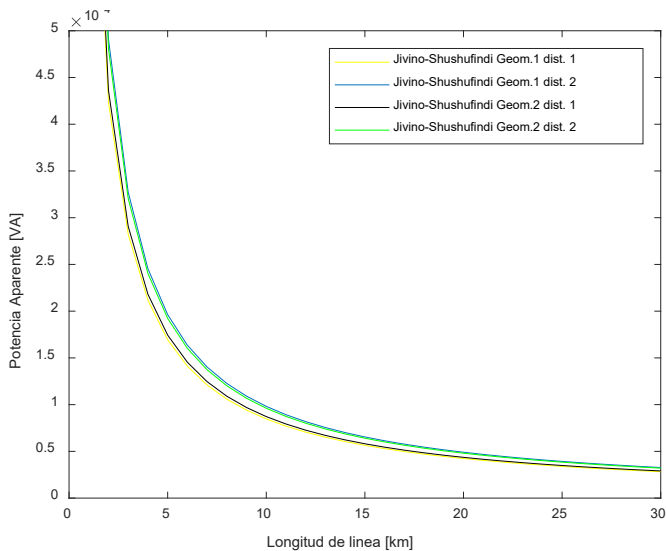


Figura 4. Resultados de la geometría de prueba 1 con las distancias de la tabla 2.

En la figura 4, la línea de transmisión Jivino a

Shushufindi, se trata de una longitud netamente corta es decir menos a los 80km, las curvas de estas líneas son más claras, pero existe mayor pérdida de la potencia aparente comienza en 50 KVA, y tiende a estabilizarse a los 25km, con potencia de 500 VA.

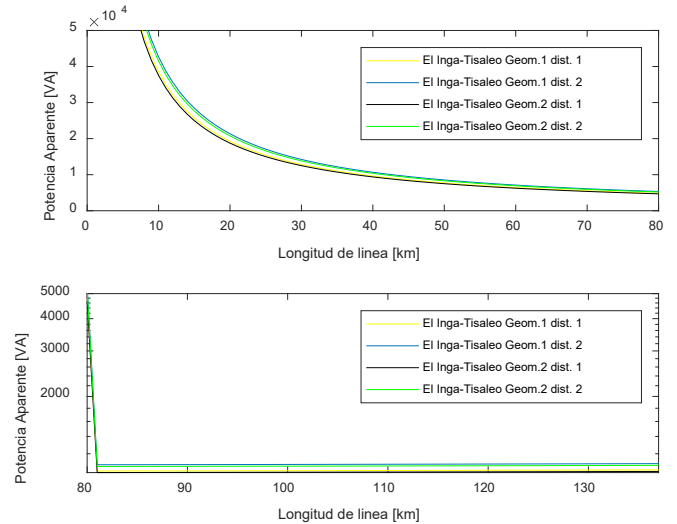


Figura 5. Resultados de la geometría de prueba 1 con las distancias de la tabla 2.

En la figura 5, se puede apreciar la línea de transmisión El Inga a Tisaleo, en cualquiera de las dos geometrías y a diferentes distancias la potencia aparente comienza en 50 KVA, y tiende a estabilizarse a los 70km, a partir de los 80km hasta los 81km es decir en una longitud mediana, provoca una caída de potencia aparente de 1KVA una manera más brusca a 500 VA en esta línea de transmisión existe una mayor pérdida de potencia aparente hasta estabilizarse a los 81km.

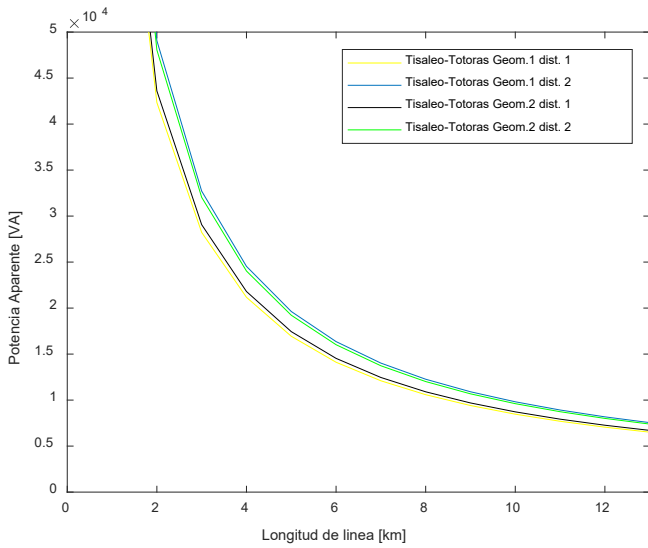


Figura 6. Resultados de la geometría de prueba 1 con las distancias de la tabla 2.

Como se puede ver en la figura 6, la línea de transmisión Tisaleo a Totoras Shushufindi, al igual que la línea de transmisión Jivino a Shushufindi se trata de una longitud netamente corta, las curvas de estas líneas son más claras, pero existe mayor pérdida de la potencia aparente comienza en 50 KVA, y tiende a estabilizarse a los 12 Km, con potencia de 500 VA.

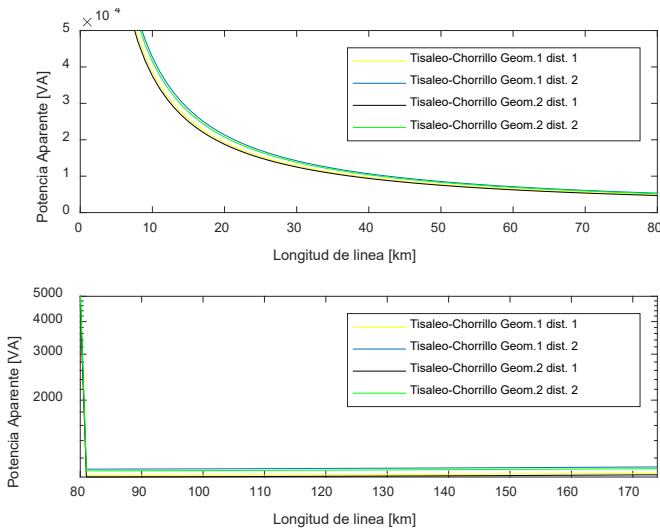


Figura 7. Resultados de la geometría de prueba 1 con las distancias de la tabla 2.

Como se aprecia en la figura 7 la línea de transmisión Tisaleo-Chorrillos, en cualquiera de las dos geometrías y a diferentes distancias la potencia aparente comienza en 50 KVA, y tiende a estabilizarse a los 70km, a partir de los 80km hasta los 81km es decir en una longitud mediana, provoca una caída de potencia aparente de una

manera más brusca y prolongada, ese efecto se produce hasta estabilizarse en una longitud de línea mediana.

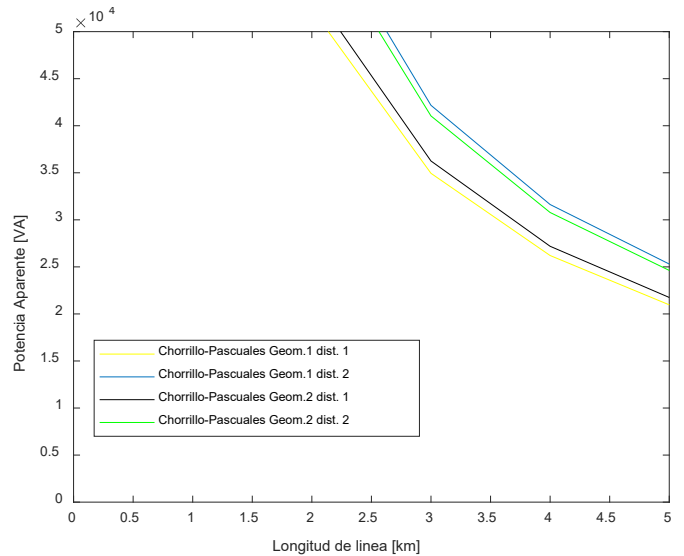


Figura 8. Resultados de la geometría de prueba 1 con las distancias de la tabla 2.

Como se aprecia en la figura 8 la línea de transmisión Chorillo a Pacuales, en cualquiera de las dos geometrías y diferentes distancias la potencia aparente comienza en 50 KVA, y se pueden estabilizar a los 5Km además se puede afectar que no existe mayor pérdida de potencia aparente.

9. Conclusiones

Los resultados de la prueba obtenidos gracias a los diferentes distancias medias geométricas y diferentes radios geométricos, se aprecia claramente en las simulaciones, una caída tosca cuando se pasa de una longitud corta es decir menor a 80km a una longitud mediana entre 80km y 230km.

El límite de estabilidad para líneas de transmisión de longitud corta que son menor o igual a 80km se da gracias a que en un sistema de transmisión de longitud corta, el valor de la capacitancia y conductancia es igual a cero, y por otro lado cuando pasa a una longitud larga que es mayor a una longitud de 230km los límites de estabilidad cambian porque existe valor de los parámetros longitudinales.

De este análisis se aprecia que a menor distancia entre conductores y líneas es menor la capacidad de potencia que estas pueden transmitir, esto se puede constatar y recalcular gracias a las ecuaciones (2) y (3) presentadas en los parámetros longitudinales y transversales, esto se

produce ya que la longitud es directamente proporcional al valor de inductancia y capacitancia, además como se aprecia en la ecuación (5) que representa el cálculo de Surge Impedance Loading, dicha ecuación depende de los valores longitudinales y transversales de las líneas de transmisión.

REFERENCIAS

- [1] M. C. Tavares, "Enhancement the overhead transmission lines' capacity by modifying the bundle geometry using heuristics algorithms," *2016 IEEE PES Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf.*, pp. 646–650, 2016.
- [2] A. Roger *et al.*, "Lightning performance of transmission lines based upon real return-stroke current waveforms and statistical variation of characteristic parameters," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 153, pp. 46–59, 2017.
- [3] M. E. Webber, "Reduced Transmission Grid Representation using the St. Clair Curve applied to the Electric Reliability Council of Texas," *2017 14th Int. Conf. Eur. Energy Mark.*, pp. 1–5.
- [4] S. R. Ola, "Reactive power flow control using Static VAR Compensator to improve voltage stability in transmission system," *2016 Int. Conf. Recent Adv. Innov. Eng.*, pp. 1–5, 2016.
- [5] A. Fateh, M. Nor, M. Sulaiman, and R. Omar, "Study of Voltage and Power Stability Margins of Electrical Power System Using ANN," pp. 7–13.
- [6] C. Rafael, "Determinación de límites de transmisión en sistemas eléctricos de potencia Determination of Transmission Limits on Electric Power Systems," *Ing. Investig. y Tecnol.*, vol. 15, no. 2, pp. 271–286, 2014.
- [7] D. Lauria and S. Quaia, "Loadability Increase in Radial Transmission Lines through Reactive Power Injection," pp. 684–688, 2017.
- [8] A. Gas, "of Transmission Lines," pp. 1152–1157.
- [9] J. Hao and W. Xu, "Extended Transmission Line Loadability Curve by Including Voltage Stability Constrains," vol. 2, no. 4, pp. 1–5, 2008.
- [10] T. M. Papazoglou, "Maximum efficiency of interconnected transmission lines," vol. Vol. 141, pp. 353–356, 1994.
- [11] L. Dawson and A. M. Knight, "rating regime," *2016 IEEE Can. Conf. Electr. Comput. Eng.*, pp. 1–6, 2016.
- [12] R. Alipio, M. H. R. Duarte, J. C. A. Dias, and A. S. De Miranda, "Lightning performance of transmission lines partially protected by surge arresters considering typical Brazilian conditions," *2017 Int. Symp. Light. Prot. XIV SIPDA 2017*, no. October, pp. 365–369, 2017.
- [13] Q. Fei, H. Zhou, X. Han, and J. Wang, "Structural health monitoring oriented stability and dynamic analysis of a long-span transmission tower-line system," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 20, pp. 80–87, 2012.
- [14] D. Duarte, L. Perro, and M. M. Fernandes, "lightning performance using a statistical approach."
- [15] M. Ntuli and R. Xezile, "Increasing the Capacity of Transmission Lines via Current Uprating: An Updated Review of Benefits, Considerations and Developments," *2016 Australas. Univ. Power Eng. Conf.*, pp. 1–6, 2016.
- [16] F. Koehler and J. Swingler, "Analysis of Flashover Mitigation Measures to Improve the Lightning Performance of Transmission Lines," *2018 53rd Int. Univ. Power Eng. Conf.*, pp. 1–6, 2018.
- [17] H. Bo *et al.*, "Advances in Engineering Software A method for analyzing stability of tower-line system under strong winds," vol. 127, no. September 2018, pp. 1–7, 2019.
- [18] P. Malicki, S. Papenheim, and M. Kizilcay, "Shielding failure analysis of a hybrid transmission line with AC and DC systems on the same tower," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 159, pp. 2–8, 2018.
- [19] S. Kucuk and L. F. Fernandez, "Extension of The Largest Turkish Oil Refinery's Electrical Power System: " $M = \text{fM} - \text{' M ' : } \sim \text{' r } \sim \text{I}$," pp. 87–90, 2017.
- [20] Y. Du, X. Wang, and M. Chen, "Transient surge impedance of a vertical conductor over the ground," vol. 94, pp. 106–112, 2013.
- [21] K. Sheshyekani *et al.*, "The impact of the grounding system on the lightning performance of transmission lines: A sensitivity analysis," *2010 30th Int. Conf. Light. Prot.*, vol. 2010, pp. 1–6, 2010.
- [22] L. D. E. Compensaci, R. Serie, E. N. La, D. E. L. Sistema, and N. Interconectado, "Escuela politécnica nacional," 2012.
- [23] U. Mustafa, M. S. Bin Arif, H. Rahman, and M. A. B. Sidik, "Modelling and optimization of simultaneous AC-DC transmission to enhance power transfer capacity of the existing transmission lines," *ICECOS 2017 - Proceeding 2017 Int. Conf. Electr. Eng. Comput. Sci. Sustain. Cult. Herit. Towar. Smart Environ. Better Futur.*, pp. 328–332, 2017.
- [24] J. Lin, Q. Zhang, G. Sheng, Y. Yan, and X. Jiang, "Prediction System for Dynamic Transmission Line Load Capacity Based on PCA and Online Sequential Extreme Learning Machine," *2018 IEEE Int. Conf. Ind. Technol.*, pp. 1714–1717.
- [25] T. Suwada, "Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A Characteristic analysis of coupled transmission lines in stripline-type beam position monitor," *Nucl. Inst. Methods Phys. Res. A*, vol. 705, pp. 7–12, 2013.
- [26] T. Jang, S. Lee, K. Shin, and D. Lee, "Comparison of electrical-environment characteristics between two different types of EHV transmission lines," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 36, no. 20, pp. 881–886, 2003.