

IMPLEMENTACIÓN DE UN MÉTODO DE REFERENCIA PARA EL CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DE CONDUCTORES DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN AÉREAS

IMPLEMENTATION OF A REFERENCE METHOD FOR CALCULATION OF THE RESISTANCE OF CONDUCTORS OF OVERHEAD TRANSMISSION LINES

Jorge Luis Aguilar Marín

Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México
jorge.aguilar@uaem.edu.mx

Luis Cisneros Villalobos

Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México
luis.cisneros@uaem.mx

Daniel Hernández González

Tecnológico Nacional de México / IT de Toluca, México
dhernandezg@toluca.tecnm.mx

Recepción: 24/noviembre/2023

Aceptación: 26/diciembre/2023

Resumen

Se propone la implementación de un método de referencia y su programación en MATLAB incorporando los criterios de diseño empleados en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) para el cálculo de la resistencia eléctrica de conductores. Se presenta el análisis y cálculo de la resistencia eléctrica de un conductor de una línea de transmisión de 115 kV, los resultados del método son consistentes con los obtenidos con el programa desarrollado. El estudio puede aplicarse en el desarrollo de líneas de transmisión para validar la resistencia eléctrica de los conductores a instalar.

Palabras Clave: Alta tensión, Líneas de transmisión, Parámetros eléctricos.

Abstract

The implementation of a reference method and its programming in MATLAB is proposed, incorporating the design criteria used in the National Electrical System (SEN) for the calculation of the electrical resistance of conductors are proposed. The

analysis and calculation of the electrical resistance of a conductor of a 115 kV transmission line is presented; the results of the method are consistent with those obtained with the developed program. The study can be applied in the development of transmission lines to validate the electrical resistance of the conductors to be installed.

Keywords: *Electrical parameters, High voltage, Transmission lines.*

1. Introducción

Las líneas de transmisión son parte fundamental de los sistemas eléctricos de potencia, debido a que son las encargadas de transmitir la energía eléctrica a los puntos de demanda, por ello se debe de asegurar su correcta operación para evitar fallas dentro del sistema eléctrico.

Derivado de obtener los parámetros eléctricos de una línea de transmisión se pueden tomar consideraciones importantes para su diseño, construcción y operación, por ejemplo, en el estudio de flujos de potencia, se hace necesario simular cada elemento del sistema de potencia a través de su respectivo modelo equivalente. Tales cálculos permiten analizar el comportamiento en régimen permanente del sistema de potencia bajo variedad de condiciones operativas.

A pesar de la importancia de determinar los parámetros eléctricos de las líneas de transmisión, cuando se requiere calcular la resistencia eléctrica de conductores, no se cuenta con un programa que considere los criterios de diseño.

En base a lo descrito previamente, se propone la implementación de un método y el desarrollo de un programa incorporando los criterios de diseño empleados en el SEN para el diseño de líneas de transmisión.

Cable conductor

El componente principal de una línea de transmisión es el cable conductor. Existe una gran variedad de tipos de cables conductores empleados para la transmisión de energía eléctrica en forma aérea con diferentes características, conformación y tratamiento de los materiales que lo componen. Los materiales utilizados para la fabricación de conductores son designados por el Instituto Nacional Estadounidense

de Estándares (ANSI) y especificados por la Sociedad Estadounidense de Prueba de Materiales (ASTM). Los cables conductores se fabrican de diversos hilos de aluminio, cobre y acero, sin embargo, actualmente no es común el uso de cobre para la fabricación de cables para líneas de transmisión aéreas [CFE, 2012].

Existen cuatro tipos de conductores convencionales:

- Conductores Totalmente de Aluminio (AAC).
- Conductor de Aluminio Reforzado con Acero (ACSR).
- Conductor de Aleación de Aluminio (AAAC).
- Conductor de Aluminio, Aleación de Aluminio Reforzado (ACAR).

Independientemente del tipo de material utilizado, los hilos siempre son redondos y dispuestos en capas concéntricas. Su desempeño ha sido probado por mucho tiempo bajo condiciones y aplicaciones específicas [CFE, 2012].

2. Métodos

La resistencia eléctrica de un conductor aéreo determina las pérdidas y los límites máximos de la capacidad de conducción de corriente en el propio conductor. Los factores que afectan las propiedades eléctricas de un conductor aéreo son: la conductividad del material, el área de la sección transversal, la temperatura, la frecuencia y la densidad de corriente. Incluso, una vez instalado el conductor, estas propiedades eléctricas son también influenciadas por la localización física del conductor en relación con otros conductores y del suelo [Southwire, 2010].

La resistencia eléctrica es un factor preponderante para tomar en cuenta en la selección del conductor para una línea de transmisión de energía eléctrica. Como se mencionó, la capacidad de conducción de energía eléctrica se ve afectada por una serie de fenómenos que provocan la distribución no uniforme de la corriente en el conductor (efecto piel, proximidad, etc.), modificando el valor de la resistencia eléctrica; por esto en el estudio de las líneas de transmisión aéreas se distinguen dos tipos de resistencia eléctrica [González, 2008].

- Resistencia en corriente directa (R_{CD}).
- Resistencia en corriente alterna (R_{CA}).

La resistencia de los conductores de líneas de transmisión aéreas es la causa más importante de pérdida de potencia en ellas. El término resistencia, a menos que sea calificado específicamente, se refiere a la resistencia efectiva de un conductor y es definida por la ecuación 1 [Morgan, 2013].

$$R = \frac{W}{|I|^2} \quad (1)$$

R es la resistencia efectiva, en Ω , W es la pérdida de potencia en el conductor, en W , I es la corriente rms en el conductor, en A .

Resistencia eléctrica en corriente directa R_{CD}

Para un conductor cilíndrico de diámetro uniforme se tiene una resistencia total en CD por unidad de longitud, la cual es expresada por la ecuación 2 [Morgan, 2013].

$$R_{CD} = \frac{\rho l}{A} \quad (2)$$

Donde R_{CD} representa la resistencia en corriente directa, en Ω/m , ρ es la resistividad del material, en Ω/mm^2 , l es la longitud del conductor, en m , y A es la sección transversal del conductor, en mm^2 . La sección transversal del conductor se obtiene a través de la ecuación 3.

$$A = \frac{\pi}{4} h d^2 \quad (3)$$

Donde, h representa el número de hilos del conductor y d es el diámetro de los hilos del conductor en mm .

De la ecuación 2 se define que la resistencia depende de la geometría (longitud y área) y el tipo de material utilizado como conductor (resistividad eléctrica). Además, esta ecuación solo es válida para conductores de tipo sólido, pero en la realidad los conductores utilizados están constituidos por hilos de tipo sólido que se trenzan en forma helicoidal para conformar conductores multifilares; debido al trenzado, los conductores de este tipo poseen mayor longitud obteniendo como resultando una resistencia eléctrica mayor. Se considera que, para un conductor multifilar trenzado con una longitud de una milla, todos los hilos excepto el central, tienen que recorrer

debido al trenzado una milla más. Debido a la diferencia de las longitudes de los hilos de un conductor trenzado, el valor de resistencia calculado por la ecuación 2 se debe corregir por medio de incrementos estandarizados [González, 2008].

Con base en el estándar ASTM B232 “Concentric- Lay- Stranded Aluminum Conductors, Coated-Steel Reinforced (ACSR)” [ASTM, 2001], la resistencia por unidad de longitud se puede determinar con los incrementos estandarizados que se muestran en la tabla 1 [ASTM, 2001].

Tabla 1 Incrementos estandarizados.

Diseño de trenzado aluminio/acero	Incrementos estandarizados debido al trenzado	
	Aluminio (%)	Acero (%)
26/7	2.5	0.4
45/7	2.5	0.4
54/7	2.5	0.4

Fuente: elaboración propia.

Es importante mencionar que, en el caso de conductores compuestos de hilos de distintos materiales, el cálculo de la resistencia total debe ser llevada a cabo considerando las características particulares de estos materiales; en ocasiones el fabricante entrega el valor de resistencia para dichos conductores.

Resistencia eléctrica en corriente alterna R_{CA}

La resistencia en corriente alterna (R_{CA}) se diferencia de su homóloga en corriente directa (R_{CD}) en el hecho que la primera considera la distribución no uniforme de la corriente a lo largo de la sección transversal de conductor [González, 2008]. Cuando un conductor conduce corriente alterna, la distribución de la densidad de la corriente a través de su sección transversal no es uniforme y esta se encuentra en función de la frecuencia de la corriente en CA. Este fenómeno es conocido como *efecto piel* o *efecto superficial*, el cual provoca que la resistencia en CA a 60 Hz sea más grande que la resistencia en CD; la resistencia en CA de un conductor de una línea de transmisión aérea puede tener una magnitud entre el 5 y 10% mayor que su resistencia en CD.

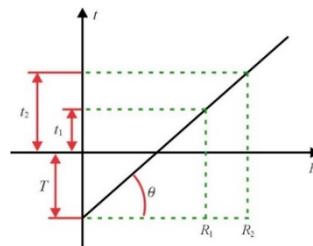
Los conductores actualmente utilizados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en líneas de transmisión aéreas se muestran en la especificación CFE

E1000-12 “Cable de aluminio con cableado concéntrico y núcleo de acero galvanizado” [CFE, 2020], en la mayoría de los casos el valor de la resistencia de los conductores es proporcionado por el fabricante.

La resistencia de un subconductor que forma parte de un haz de conductores se obtiene dividiendo la resistencia individual de un conductor entre el número de subconductores del haz [CIGRE, 2014].

Variación de la resistencia de los conductores en función de la temperatura

La variación de la resistencia de los conductores metálicos en función de la temperatura se presenta en una relación lineal, para un rango normal de operación. Si se grafica sobre el eje vertical la temperatura y la resistencia sobre el horizontal como se presenta en la figura 1, la extensión de la recta de la gráfica es un método conveniente para corregir la resistencia por la variación de la temperatura. El punto de intersección de la extensión de línea con el eje de la temperatura a resistencia cero, es una constante del material [Grainger, 1996].



Fuente: elaboración propia.

Figura 1 Resistencia de un conductor metálico en función de la temperatura.

De la geometría de la figura 1 se puede observar que R_1 y R_2 son las resistencias del conductor a las temperaturas t_1 y t_2 respectivamente en $^{\circ}\text{C}$ y T es la constante de temperatura determinada en la gráfica.

De la figura 1, se obtiene la ecuación 4.

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{T + t_1}{R_1} = \frac{T + t_2}{R_2} \quad (4)$$

Donde T representa la constante de temperatura en función del material del conductor, en $^{\circ}\text{C}$, t_1 y t_2 , representan las temperaturas en el conductor, en $^{\circ}\text{C}$, R_1 es

la resistencia del conductor a temperatura t_1 , en Ω y R_2 es la resistencia del conductor a temperatura t_2 , en Ω .

La constante T es obtenida del hecho de extrapolar el valor de la resistencia hasta una temperatura de 0°C , algunos valores de la constante de temperatura se presentan en la tabla 2 [Grainger, 1996].

Tabla 2 Valores de la constante de temperatura en distintos materiales.

Material	T
Cobre recocido	234.5
Cobre estirado en frío	241
Aluminio estirado en frío	228

Fuente: [Grainger, 1996].

La relación de resistencias se obtiene a través de la ecuación 5 [CIGRE, 2014].

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{T + t_2}{T + t_1} \quad (5)$$

Al realizar sustituciones algebraicas en ecuación 5 se obtiene la relación de resistencia en función de la temperatura, ecuación 6 [Gonen, 2011].

$$R_2 = R_1[1 + \alpha \cdot (t_2 - t_1)] \quad (6)$$

Donde α representa el coeficiente de temperatura, en $^\circ\text{C}^{-1}$. En la tabla 3 se presentan algunos valores de resistividad eléctrica para diversos materiales.

Tabla 3 Resistividad y coeficiente de temperatura de conductores.

Material	Resistividad (ρ) $\Omega \cdot \text{CM}/ft$	Coeficiente de temperatura (α) a 20°C
Aluminio	17.00	0.0039
Latón	38-51	0.02
Bronce	78-108	0.0005
Cobre	Temple duro	0.00382
	Recocido	0.00393
Hierro	60	0.0050
Plata	9.6	0.0038
Acero	72-530	0.001-0.005

Fuente: [Hawary, 2008].

3. Resultados

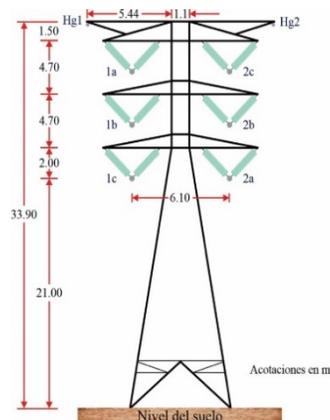
Se describen los casos de estudio y el análisis numérico de la resistencia eléctrica de conductores utilizados en líneas de transmisión aéreas.

Caso de estudio

Se considera una línea de transmisión aérea con una tensión nominal de 115 kV, donde se desea determinar los siguientes parámetros:

- Calcular la resistencia óhmica por kilómetro a 50 °C para los hilos de aluminio del conductor.
- Calcular la resistencia óhmica por kilómetro a 50 °C para los hilos de acero del conductor.
- Calcular la resistencia óhmica total del conductor a 50 °C.

El perfil de la línea de transmisión se presenta en la figura 2. El conductor utilizado en las fases es un ACSR “Canary” calibre 900 kCM el cual tiene 54 hilos de aluminio y un alma de acero de 7 hilos, el diámetro para los hilos de aluminio y de acero es de 3.28 mm.



Fuente: elaboración propia

Figura 2 Perfil de la línea de transmisión de 115 kV.

Cálculo de la resistencia óhmica por kilómetro a 50 °C para los hilos de aluminio del conductor

Primeramente, se determina la sección transversal de los hilos de aluminio sustituyendo valores en la ecuación 3:

$$A_{Al} = 456.27 \text{ mm}^2$$

La relación para expresar el área en kCM (circular mil) o en mm^2 , está determinada por la ecuación 7.

$$1 [CM] = 5.067 \times 10^{-4} mm^2 \quad (7)$$

Por lo tanto, el área del aluminio expresada en kCM será de:

$$A_{Al} = 900.49 kCM$$

Para determinar la resistencia de los hilos de aluminio a $20^\circ C$, de la tabla 3 se obtiene el valor de la resistividad de estos hilos de aluminio que es igual a $\rho = 17 [\Omega \cdot CM/ft]$. También se conoce que $1 km = 3280.84 ft$, por lo tanto, sustituyendo valores en la ecuación 2 se tiene que:

$$R_{Al20^\circ C} = 0.0619 \Omega/km$$

Se considera un factor de incremento en el aluminio de 2.5% con base en la tabla 1, por lo tanto, la resistencia considerando la corrección por el trenzado será de:

$$R_{Al20^\circ C} = 0.0619 \Omega/km \times 1.025 = 0.0634 \Omega/km$$

Finalmente, la resistencia de la parte de aluminio a $50^\circ C$ se calcula utilizando la ecuación 6 y obteniendo, de la tabla 3, el valor de $\alpha = 0.0039^\circ C^{-1}$ para el aluminio. Entonces, sustituyendo valores se tiene que la resistencia es:

$$R_{Al50^\circ C} = 0.070 \Omega/km$$

Cálculo de la resistencia óhmica por kilómetro a $50^\circ C$ para los hilos de acero del conductor

Primeramente, se determina la sección transversal de los hilos de acero sustituyendo valores en la ecuación 3:

$$A_{Ac} = 59.14 mm^2$$

La relación de la sección transversal de los hilos de acero en kCM se obtiene a través de la relación mostrada en la ecuación 7 como:

$$A_{Ac} = 116.79 kCM$$

Para determinar la resistencia de los hilos de acero a $20^\circ C$, de la tabla 3 se obtiene el valor de la resistividad de estos hilos de acero que es igual a $\rho = 90 [\Omega \cdot CM/ft]$. Por lo tanto, sustituyendo valores en la ecuación 2 se tiene que:

$$R_{Ac20^\circ C} = 2.52 \Omega/km$$

Se considera un factor de incremento en el acero de 0.4% con base en la tabla 1, por lo tanto, considerando la corrección por el trenzado la resistencia será de:

$$R_{Ac20^{\circ}C} = 2.53 \Omega/km$$

La resistencia de los hilos de acero a 50 °C se determina utilizando la ecuación 6 y obteniendo, de la tabla 3, el valor de $\alpha = 0.0044 \text{ }^{\circ}C^{-1}$ para el acero; por lo tanto, sustituyendo valores se tiene que la resistencia es:

$$R_{Ac50^{\circ}C} = 2.86 \Omega/km$$

El cálculo de la resistencia óhmica total del conductor a 50 °C es:

$$R_{50} == 0.0682 \Omega/km$$

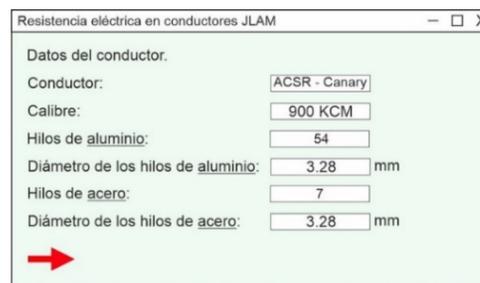
Análisis numérico

El método descrito anteriormente fue programado en MATLAB para desarrollar el cálculo de la resistencia eléctrica de conductores utilizados en líneas de transmisión aéreas. En las figuras 3, 4, 5 y 6 se presentan las pantallas de la interfaz del programa desarrollado, en el cual, se capturaron los datos del caso de estudio.



Fuente: elaboración propia.

Figura 3 Datos del proyecto.



Fuente: elaboración propia

Figura 4 Datos de entrada del conductor.



Fuente: elaboración propia.

Figura 5 Datos de entrada del factor de incremento.

Material	Resistividad (ρ) $\Omega \cdot \text{CM}/\text{ft}$	Coeficiente de temperatura (α) a 20 °C
Aluminio	17.00	0.0039
Latón	38-51	0.02
Bronce	78-108	0.0005
Cobre	Temple duro	10.62
	Recocido	10.37
Hierro	60	0.0050
Plata	9.6	0.0038
Acero	72-530	0.001-0.005

Coeficiente de temperatura: Resistividad:

Fuente: elaboración propia

Figura 6 Datos de entrada del coeficiente de temperatura y de la resistividad.

La figura 7, presenta la interfaz de los resultados obtenidos de la resistencia eléctrica para el caso de estudio. Los resultados obtenidos por el método son idénticos a los presentados en el programa, lo cual confirma su precisión.

Resultado.

- Resistencia óhmica para los hilos de aluminio a 50 °C
 $R_{oh} = 0.0700 \Omega/km$
- Resistencia óhmica para los hilos de acero a 50 °C
 $R_{oh} = 2.8600 \Omega/km$
- Resistencia óhmica total del conductor a 50 °C
 $R_T = 0.0682 \Omega/km$

Fuente: elaboración propia

Figura 7 Resistencia eléctrica del conductor.

4. Discusión

Con el objetivo de validar los resultados obtenidos por el programa, se calcularon las resistencias de tres líneas de transmisión presentadas en [Aljure, 2008]: Betania - Mirolindo, Circo - Paraíso y Ancón Sur - Esmeralda. La tabla 4 presenta la evaluación sobre las líneas. Los resultados obtenidos se compararon con los valores oficiales reportados en [Aljure, 2008]. Las resistencias fueron calculadas a partir de las características de los conductores de las líneas de transmisión. En la tabla 4 se observa una diferencia porcentual del 0.2% entre la resistencia reportada como valor oficial y la resistencia calculada con el programa. Como puede apreciarse, no se presenta una diferencia significativa entre los valores oficiales y los calculados. Esto refleja la exactitud y precisión del programa desarrollado para el cálculo de la resistencia eléctrica, garantizando un cálculo correcto.

Tabla 4 Análisis comparativo del valor oficial de la resistencia y el calculado.

Línea de transmisión	Resistencia, en Ω/km	
	Valor oficial	Calculada
1. Betania - Mirolindo	0.0628	0.0626
2. Circo - Paraíso	0.0440	0.0439
3. Ancón Sur - Esmeralda	0.0588	0.0586

Fuente: elaboración propia.

5. Conclusiones

- Se presentó un método de referencia, que contiene los pasos necesarios para calcular la resistencia eléctrica de un conductor de una línea de transmisión aérea. La versatilidad del método permitió su programación en MATLAB para realizar un análisis del comportamiento de la resistencia.
- Se presentó el análisis y cálculo de la resistencia eléctrica de un conductor de una línea de transmisión de 115 kV.
- Los resultados obtenidos por el método fueron idénticos a los presentados por el programa, lo cual confirmó su precisión. Se validó la efectividad del programa desarrollado mediante la comparación de datos oficiales de 3 líneas de transmisión, generando una diferencia porcentual máxima del 0.2%.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Aljure, M. & Peñuela, C. Resistencia y pérdidas de potencia en líneas de transmisión. Revista Investigaciones Aplicadas, No. 4, 35-40, 2008.
- [2] America Society of testing materials (ASTM). Concentric – Lay - Stranded Aluminum Conductors, Coated-Steel Reinforces (ACSR). USA. 2001.
- [3] CIGRE. Overhead lines a CIGRE green book. Paris, 2014.
- [4] Comisión Federal de Electricidad (CFE). Cable de aluminio con cableado concéntrico y núcleo de acero galvanizado (ACSR). CFE E1000-12. México. 2020.
- [5] González, F. M. Impedancia serie de sistemas de transmisión. 2008.
- [6] Hawary, M. E. Introduction to electrical power systems. John Wiley & Sons. 2008.

- [7] Comisión Federal de Electricidad (CFE). Manual para diseño electromecánico de líneas de transmisión aéreas. México. 2012.
- [8] Gonen, T. Electrical power transmission system engineering: analysis and design. CRC press. 2011.
- [9] Grainger, J. & Stevenson, W. D. Análisis de sistemas de potencia. 1996.
- [10] Morgan, V. T. The current distribution, resistance, and internal inductance of linear power system conductors a review of explicit equations. IEEE Transactions on Power Delivery, No. 28, 1252-1262, 2013.
- [11] Southwire. Overhead conductor manual. 3rd edition, 2010.