

HERRAMIENTA COMPUTACIONAL DE CÓDIGO ABIERTO PARA EL CÁLCULO DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE LÍNEAS CON ÉNFASIS EN LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA

Scaramutti, José C.; Dias, Ricardo; Arrojo, Carlos D.; Nastta, Hernán A.

UIDET - LEME - Ensayos y Mediciones Eléctricas
Dto. de Electrotecnia, Facultad de Ingeniería (UNLP)
Calle 49 y 116 - (1900) La Plata, Bs. As.
leme@ing.unlp.edu.ar

RESUMEN

Se presenta una herramienta computacional de código abierto para el cálculo de parámetros eléctricos de líneas. La misma consiste en un programa implementado en MatLab, que cuenta con una interfaz gráfica, mediante la cual el usuario puede realizar los cálculos de los parámetros de líneas en forma ágil y simple, cargando los datos necesarios, a saber: disposición de instalación, características geométricas y eléctricas de los conductores, resistividad del terreno, frecuencia de trabajo, etc., introduciéndolos directamente en los campos editables de la interfaz gráfica o bien cargándolos desde un archivo de una planilla de cálculo, con solo indicar el nombre del archivo.

Una vez introducida la información requerida, el programa calcula las matrices de impedancia y admitancia primitivas, teniendo en cuenta el efecto pelicular y el efecto de la resistencia del terreno mediante el método de los conductores imagen de Carson, en el caso de líneas aéreas, o según el método de Pollaczek o el aproximado de Wedepohl en el caso de cables subterráneos.

Las matrices de impedancia y admitancia equivalentes de fase, se computan por aplicación de la reducción de Kron. Finalmente, la aplicación del método de componentes simétricas, permite obtener las matrices de impedancia y admitancia de secuencia. Estas matrices son calculadas sea que se considere la línea transpuesta o no, o que ella sea trifásica, bifásica o monofásica.

Siendo que el código fuente estará disponible para quien lo requiera, podrá usarse en otras rutinas de MatLab o bien podrá trasladarse a otros lenguajes según necesidad (C, Fortran).

Palabras clave: Parámetros de líneas, Distribución de energía, Matriz de impedancia primitiva, Matriz de admitancia primitiva, Matriz de impedancia de fase equivalente, Matriz de admitancia de fase equivalente, Reducción de Kron.

1. INTRODUCCIÓN

El artículo tiene por objeto presentar el marco teórico que ha servido de base para desarrollar un programa digital de código abierto para el cálculo de parámetros eléctricos de líneas aéreas y subterráneas, trifásicas, bifásicas o monofásicas, transpuestas o no (este último caso, de mayor consideración en distribución). Si bien este tipo de herramienta existe en el mercado, generalmente está integrada como un subprograma o un módulo específico de programas comerciales (PSCAD, Neplan, etc.), que por un lado tienen un elevado costo y por otro, requieren el conocimiento de la operación de todo el paquete informático y no sólo del módulo que se pretende usar. Además, aún en programas que no son comerciales (por ejemplo, ATP-EMPT), el código fuente no está disponible.

El programa que se presenta calcula las matrices de impedancia y admitancia primitivas, mediante el método de los conductores imagen de Carson [1], en el caso de líneas aéreas, o

según el método de Pollaczek [2][3] o el aproximado de Wedepohl [4], en el caso de cables subterráneos. Luego, utilizando la reducción de Kron[5], calcula también las matrices de impedancia y admitancia equivalentes de fase, y finalmente, por aplicación del método de componentes simétricas [5], se obtienen las matrices de impedancia y admitancia de secuencia. La utilidad de estas últimas matrices se ve reducida en sistemas de distribución con alimentadores no transpuestos, por cuanto no serán matrices diagonales, debido al acoplamiento entre secuencias.

2. MARCO TEÓRICO

El cálculo de los parámetros de líneas requiere como insumos básicos datos relativos a la disposición geométrica típica de instalación de conductores o cables, sus características geométricas y eléctricas, la resistividad del terreno y la frecuencia a la que se desea calcular los parámetros.

Las resistencias de los elementos conductores corresponderán a la temperatura de trabajo, si no fuera así el programa las corregirá de acuerdo a la conocida expresión [6]:

$$R_{t_2} = R_{t_1} \cdot [1 + \alpha \cdot (t_2 - t_1)] \quad [\Omega/\text{km}] \quad \text{donde:} \quad (1)$$

R_{t_2}, R_{t_1} [Ω/km] resistencias en cca las temperaturas t_2 y t_1 con $t_2 > t_1$ en [°C] y
 α [1/°C] coeficiente de variación térmica de la resistencia para el material del conductor.

2.1. Parámetros de líneas aéreas

El proceso de cálculo de parámetros implica el cómputo de impedancias y admitancias considerando efecto pelicular, de proximidad y el efecto de retorno por tierra. Las expresiones utilizadas para realizar este cálculo son, según se trate de la impedancia primitiva propia de un conductor "i" o la mutua entre un conductor "i" y otro "k", las siguientes [2]:

$$Z_{ii} = [(R)_{ii\text{interna}} + \Delta R_{ii}] + j \left(\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{2h_i}{r_i} \right) + X_{ii\text{interna}} + \Delta X_{ii} \right) \quad [\Omega/\text{km}] \quad (2)$$

$$Z_{ik} = \Delta R_{ik} + j \left(\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{D_{ik}}{d_{ik}} \right) + \Delta X_{ik} \right) \quad [\Omega/\text{km}] \quad \text{donde:} \quad (3)$$

$\omega = 2\pi f$ [Hz] pulsación electromagnética a la frecuencia f .

$\mu_0 = 4\pi 10^{-4}$ [H/km] permeabilidad magnética del espacio que rodea a los conductores reales.

$h_i = \frac{h_{i\text{max}} + 2h_{i\text{min}}}{3}$ [m] altura promedio sobre el terreno del conductor "i", con $h_{i\text{max}}$: altura máxima del conductor sobre el terreno (corresponde a su punto de sujeción al soporte) y $h_{i\text{min}}$: altura mínima (corresponde a la altura del conductor en el medio del vano) [2].

r_i [m] radio del conductor "i"

$\Delta R, \Delta X$ [Ω/km] Términos de corrección de Carson, tanto para la impedancia propia cuanto mutua.

$R_{i\text{interna}}$ [Ω/km] Resistencia del conductor en corriente alterna a la temperatura de trabajo.

$X_{i\text{interna}}$ [Ω/km] Reactancia interna del conductor.

El método utiliza el concepto de conductores imágenes. Las distancias entre los conductores reales y sus imágenes medidas en metros corresponden a lo indicado en la Figura 1.

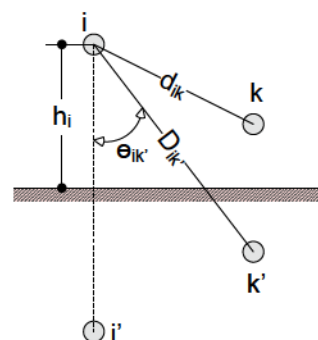


Figura 1 – Método de los conductores imágenes

Por otro lado, el cálculo de la admitancia se realiza computando la matriz de los coeficientes de Maxwell, de acuerdo a la siguiente expresión [2]:

$$P_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{2h_i}{r_i}\right) \text{ [km/F]} \quad (4)$$

$$P_{ik} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{D_{ik}}{d_{ik}}\right) \text{ [km/F]} \quad \text{donde:} \quad (5)$$

$$\epsilon_0 = \left[\frac{1}{(c)^2} \cdot \mu_0\right] \text{ [F/km]} \text{ permitividad en el vacío.}$$

$c = 299792,5$ [km/s] velocidad de la luz.

Si se desestima la conductancia en derivación, (su influencia es despreciable en líneas aéreas a la frecuencia industrial y superiores), la inversa de la matriz de coeficientes de Maxwell permite obtener la matriz de admitancia, que a su vez, puede desestimarse en líneas aéreas de media tensión.

Si bien en las líneas primarias de distribución es raro ver conductores en haz, el programa permite calcular los parámetros en estos casos. Para ello, el haz de "n" conductores separados por una distancia diametral "DH", se representa en el programa mediante un conductor con radio equivalente igual a [2]:

$$r_{equiv} = \sqrt[n]{n \cdot r_i \cdot \left(\frac{DH}{2}\right)^{n-1}} \text{ [m]} \quad (6)$$

2.1.1. Impedancia interna de los conductores, efecto pelicular y de proximidad

Cuando la frecuencia de la excitación eléctrica es nula la impedancia interna de los conductores queda determinada en su parte resistiva por la resistencia en continua a la temperatura de trabajo y la parte reactiva se computa a partir de las siguientes expresiones:

- a) Si el conductor es sólido de sección cilíndrica o bien multifilamento (se puede asociar a un conductor sólido de sección equivalente), la inductancia interna será [7]:

$$L_{intcc} = \frac{\mu_0 \mu_r}{8\pi} [H/km] \quad (7)$$

- b) Si el conductor es tubular, o bien tiene alma de acero o de una aleación de alta resistividad, la inductancia interna será:

$$L_{intcc} = 2 \cdot 10^{-4} \left[\frac{r_{int}^4}{(r_{ext}^2 - r_{int}^2)^2} \cdot \ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{int}}\right) - \frac{3 \cdot r_{int}^2 - r_{ext}^2}{4 \cdot (r_{ext}^2 - r_{int}^2)} \right] [H/km] \quad (8)$$

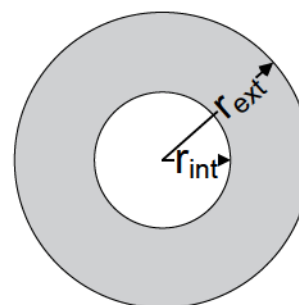


Figura 2 – Conductor tubular

Donde μ_r [pu] es la permeabilidad relativa del material que compone el conductor y los radios de acuerdo a la Figura 2.

Cuando la frecuencia no es nula la impedancia cambia por efecto de la distribución no uniforme de la corriente en la sección del conductor: efecto pelicular. La impedancia interna de cada conductor deberá ser calculada entonces de acuerdo a las siguientes expresiones:

- a) Para conductor sólido sección circular (adaptando convenientemente las expresiones que se presentan en [3] [4]):

$$Z_{int} = \frac{R \cdot r_{ext} \cdot m \cdot I_0(mr_{ext})}{2 \cdot I_1(mr_{ext})} \text{ [}\Omega/\text{km]} \quad (9)$$

b) Para conductor tubular [2]:

$$Z_{int} = \frac{R \cdot (r_{ext}^2 - r_{int}^2) \cdot m \cdot \left[I_0(mr_{ext}) \cdot K_1(mr_{int}) + K_0(mr_{ext}) \cdot I_1(mr_{int}) \right]}{2 \cdot r_{ext} \cdot \left[I_1(mr_{ext}) \cdot K_1(mr_{int}) - I_1(mr_{int}) \cdot K_1(mr_{ext}) \right]} \quad \left[\frac{\Omega}{km} \right]_d$$

onde: (10)

$R[\Omega/km]$ resistencia del conductor en cc a la temperatura de trabajo, y m es la inversa de la profundidad de penetración definida como:

$$m = \sqrt{j \cdot \frac{\omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}{R \cdot \pi \cdot (r_{ext}^2 - r_{int}^2)}} \quad [1/m] \text{ o } [1/mm] \text{ (según dimensiones de los radios)} \quad (11)$$

$I_0 I_1$: soluciones de la ecuación de Bessel modificada de primer tipo de orden cero y uno

$K_0 K_1$: soluciones de la ecuación de Bessel modificada de segundo tipo de orden cero y uno.

Teniendo en cuenta que los dos primeros términos de la parte reactiva de la ecuación (2) pueden asimilarse a un solo término si se define el mal llamado Radio Medio Geométrico (GMR):

$$\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{2h_i}{GMR}\right) = \omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{2h_i}{r_i}\right) + X_{i \text{ interna}} \quad (12)$$

Se deduce que: $GMR = r_i \cdot e^{-2\pi X_{i \text{ interna}} / \omega \cdot \mu_0}$ (13)

Para conductores dispuestos en haz, el GMR equivalente (GMR_{eq}) se calcula reemplazando en la ecuación (6) r_i por GMR .

El efecto de proximidad [6], en general puede desestimarse para la relación usual entre los radios de conductores y distancias entre ellos a las frecuencias de interés (en el rango de 50 a circa 1 MHz [3]).

2.1.2. Corrección de Carson

Bajo determinadas hipótesis (véase [2] pag. 4-5) pueden aplicarse las correcciones de Carson en las ecuaciones (2) y (3) para el caso de líneas aéreas. Siendo entonces:

$$\Delta R = 4\omega 10^{-4} \left[\frac{\pi}{8} - b_1 a \cos\vartheta + b_2 a^2 (c_2 \cos 2\vartheta + \vartheta \sin 2\vartheta) + b_3 a^3 \cos 3\vartheta - d_4 a^4 \cos 4\vartheta - b_5 a^5 \cos 5\vartheta + b_6 a^6 (c_6 \cos \right. \quad (14)$$

$$\left. \Delta X = 4\omega 10^{-4} \left[\frac{(0,6159315 - \ln a)}{2} + b_1 a \cos\vartheta - d_2 a^2 \cos 2\vartheta + b_3 a^3 \cos 3\vartheta - b_4 a^4 (c_4 \cos 4\vartheta + \vartheta \sin 4\vartheta) + b_5 a^5 \cos \right. \quad (15)$$

$$a = 4\pi\sqrt{5}10^{-4}D \sqrt{\frac{f}{\rho}} \text{ con } D = 2h_i \text{ para } Z_{ii}; \text{ y } D = d_{ik} \text{ para } Z_{ik}$$

Donde: ρ [Ωm] la resistividad del terreno y siendo las constances b_i , c_i , y d_i [8]:

$b_i = b_{i-2} \cdot \frac{\text{signo}}{i(i+2)}$ con los siguientes valores iniciales:

$b_1 = \frac{\sqrt{2}}{6}$ y $b_2 = \frac{1}{16}$ y donde $\text{signo} = \pm 1$ cambia cada 4 términos sucesivos (+1 para cuando $i=1,2,3,4$ y -1 para cuando $i=5,6,7,8$). Mientras que:

$c_i = c_{i-2} + \frac{1}{i} + \frac{1}{i+2}$ con el valor inicial de $c_2 = 1,3659315 - \ln(a)$ y

$d_i = \frac{\pi}{4} b_i$

el programa que se presenta calcula estos coeficientes para $i = 1$ a 30 (este valor puede cambiarse en el código fuente).

2.1.3. Matrices de fases y de secuencia

Las ecuaciones (2) a (5) permiten obtener las matrices primitivas debidamente corregidas, que son matrices cuadradas de dimensión n (número de conductores reales). Dado que es de interés conocer los parámetros por fase, los parámetros de los conductores que estén a potencial de tierra son reconvertidos y asimilados a los parámetros de fase mediante la reducción de Kron [5]:

Supóngase una matriz de impedancia en la que las submatrices discriminan a los conductores de fase (con subíndice f) de los que están conectados a tierra (subíndice t):

$$Z_{nn} = \begin{bmatrix} Z_{ff} & Z_{ft} \\ Z_{tf} & Z_{tt} \end{bmatrix} \quad (16)$$

La matriz reducida que se obtiene haciendo:

$$Z_{reducida} = [Z_{ff}] - [Z_{ft}][Z_{tt}]^{-1}[Z_{tf}] \quad (17)$$

que es la matriz de impedancia de fases, la que usualmente resultará ser al menos una matriz cuadrada de dimensión 3; pero, dado que en los sistemas de distribución son comunes las derivaciones monofásicas o bifásicas, puede resultar de dimensiones menores. En estos casos el programa identifica (en función de los datos ingresados) la o las fases faltantes y regenera la dimensión de la matriz adicionando vectores fila y columna nulos. Lo mismo se aplica para la matriz de admitancias.

Finalmente, por aplicación de la transformación de Fortescue [5] se obtienen los parámetros de secuencia. De la misma forma se opera para el caso de las admitancias. Debe hacerse notar, por otro lado, que en todos los casos la inversión de matrices se realiza por métodos de sustitución iterativa y no por la vía tradicional (Matlab cuenta con un operador específico para eso).

Finalmente, si se desean obtener los parámetros para los casos de líneas transpuestas, el programa modifica las matrices de fase computando la medida de los elementos diagonales para los parámetros propios y el promedio de los elementos fuera de la diagonal para los mutuos.

2.2. Parámetros de líneas subterráneas.

Las rutinas del programa que calculan los parámetros eléctricos de cables están orientadas a cables unipolares concéntricos, que pueden enterrarse arbitrariamente distanciados en el suelo a profundidades que implican considerar a la tierra como semi-infinita. En el caso de cables tripolares el cómputo de parámetro es más complejo, lo que hace preferible la medición. El marco teórico sobre el que se basa el programa puede encontrarse fundamentalmente en [2][3][4][9].

El cómputo de parámetros se realiza considerando las impedancias de lazo propias y mutuas para el caso más general de un cable con conductor, pantalla y armadura concéntricos. En este caso son tres los lazos considerados: entre el conductor y la pantalla, entre la pantalla y la armadura y entre esta última y tierra. En función de esto, las impedancias propias de lazo se calculan como:

$$Z_{11} = Z_{c_{out}} + Z_{a_{isl}^c} + Z_{p_{in}}; Z_{22} = Z_{p_{out}} + Z_{a_{isl}^p} + Z_{a_{in}}; Z_{33} = Z_{a_{out}} + Z_{a_{isl}^a} \quad (18)$$

y las mutuas:

$$Z_{12} = Z_{21} = -Z_{p_{in}}; Z_{23} = Z_{32} = -Z_{a_{in}}; Z_{23} = Z_{32} = 0 \quad (19)$$

Donde los subíndices *c*, *p* y *a* se refieren a conductor, pantalla y armadura e *in* y *out* a las superficies interna y externa de los tubos conductores, es decir, las corrientes de retorno se cierran al interior del tubo conductor (por ejemplo, del conductor se cierra por la pantalla) o al exterior del mismo (por ejemplo, de la pantalla se cierra por el conductor). Las impedancias $Z_{x,out}$ (*x* según sean *c*, *p* y *a*) se calculan con las ecuaciones (9) o (10) según corresponda, en tanto que $Z_{x,in}$ y $Z_{x,m}$ se calculan como:

$$Z_{x,in} = \frac{R \cdot (r_{ext}^2 - r_{int}^2) \cdot m \cdot I_0(mr_{int}) \cdot K_1(mr_{ext}) + K_0(mr_{int}) \cdot I_1(mr_{ext})}{2 \cdot r_{ext} \cdot I_1(mr_{ext}) \cdot K_1(mr_{int}) - I_1(mr_{int}) \cdot K_1(mr_{ext})} \quad [\Omega/km] \quad (20)$$

$$Z_{x,m} = \frac{R \cdot (r_{ext}^2 - r_{int}^2) \cdot m \cdot 1}{2 \cdot r_{ext} \cdot r_{int} \cdot I_1(mr_{ext}) \cdot K_1(mr_{int}) - I_1(mr_{int}) \cdot K_1(mr_{ext})} \quad [\Omega/km] \quad (21)$$

La impedancia de la aislación ente los elementos conductores del cable se calcula como:

$$Z_{aisl\frac{x}{x}} = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{int}}\right) \quad (22)$$

endonde, en este caso, los radios interno y externo se refieren a los del tubo de la aislación. Para completar las ecuaciones faltaría agregar a la impedancia propia del lazo 3 el efecto de la corriente de retorno por tierra, que se verá más adelante.

Dado que es de interés conocer las magnitudes eléctricas referidas al conductor, a la pantalla y a la armadura, a partir de la ecuaciones (18) a (22) puede obtenerse la matriz de impedancias que relaciona las tensiones de los elementos conductores de un cable con las corrientes que circulan por ellos [9]:

$$Z_{cpa} = \begin{bmatrix} Z_{cc} & Z_{cp} & Z_{ca} \\ Z_{pc} & Z_{pp} & Z_{pa} \\ Z_{ac} & Z_{ap} & Z_{aa} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_0 & Z_0 & Z_0 \\ Z_0 & Z_0 & Z_0 \\ Z_0 & Z_0 & Z_0 \end{bmatrix} \text{ con:} \quad (23)$$

$$Z_{cc} = Z_{11} + Z_{22} + Z_{33} + 2Z_{12} + 2Z_{23} ; Z_{pp} = Z_{22} + Z_{33} + 2Z_{23} \text{ y } Z_{aa} = Z_{33} \quad (24)$$

$$Z_{cp} = Z_{pc} = Z_{22} + Z_{33} + Z_{12} + 2Z_{23} \text{ y } Z_{ca} = Z_{pa} = Z_{ac} = Z_{ap} = Z_{33} + Z_{23} \quad (25)$$

Z_0 es la impedancia propia de las corrientes de retorno por tierra que circulan por el último conductor concéntrico del cable (la armadura en este caso) y la ecuación (27) se utiliza para su cálculo.

En el caso de una línea subterránea conformada por dos o más cables la matriz de impedancia será de orden $m \cdot n$ donde *m* será el número de capas conductoras del cable y *n* el número de cables de la línea subterránea. Por ejemplo, para el caso de una línea trifásica digamos de fases *a*, *b* y *c*, la matriz quedará integrada de acuerdo a la siguiente expresión:

$$Z_{fase} = \begin{bmatrix} Z_{cpa_a} & Z_{0cp} & Z_{0ca} \\ Z_{0cp} & Z_{cpa_b} & Z_{0pa} \\ Z_{0ca} & Z_{0pa} & Z_{cpa_c} \end{bmatrix} \quad (26)$$

donde los elementos fuera de la diagonal son las impedancia mutuas de las corrientes de retorno por tierra de los conductores concéntricos más externos de los cables de cada fase.

El programa calcula las impedancias debidas a las corrientes de retorno por tierra de acuerdo a Pollazcek, que por razones de espacio no se documentan aquí, pero que el lector podrá consultar en [3], o bien, mediante las aproximaciones propuestas por Wedepohl [4], que dan resultados iguales al cálculo exacto hasta frecuencias cercanas a 1MHz [3] y que son:

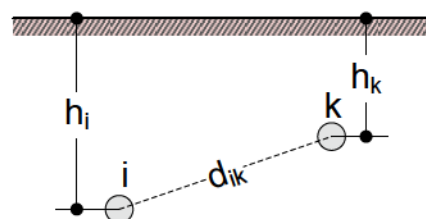


Figura 3 – Cables subterráneos

$$Z_0 = \frac{\rho m^2}{2\pi} \left(-\ln \left(\frac{\gamma \cdot m \cdot r_{ext}}{2} \right) + 0,5 - \frac{3}{4} m \cdot h_i \right) \left[\frac{\Omega}{m} \right] \quad (27)$$

$$Z_{om} = \frac{\rho m^2}{2\pi} \left(-\ln \left(\frac{\gamma \cdot m \cdot d_{ik}}{2} \right) + 0,5 - \frac{3}{4} m (h_i + h_k) \right) \left[\frac{\Omega}{m} \right] \quad (28)$$

Donde h_i, h_k y d_{ik} son según la figura 3 y $\gamma = 0.5772156649$ es la constante de Euler y

$$m = \sqrt{j \cdot \frac{\omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}{\rho}} \text{ con } \mu_0 = 4\pi 10^{-7} \left[\frac{H}{m} \right] \text{ y } \rho [\Omega m] \quad (29)$$

En cuanto a la matriz de admitancias de fase para las líneas subterráneas se tiene que:

$$Y_{fase} = \begin{bmatrix} Y_a & 0 & 0 \\ 0 & Y_b & 0 \\ 0 & 0 & Y_c \end{bmatrix} \text{ con } Y_{ff} = \begin{bmatrix} \frac{Y_{aisl_c}}{p} & -\frac{Y_{aisl_c}}{p} & 0 \\ -\frac{Y_{aisl_c}}{p} & \frac{Y_{aisl_c}}{p} + \frac{Y_{aisl_p}}{a} & -\frac{Y_{aisl_p}}{a} \\ 0 & -\frac{Y_{aisl_p}}{a} & \frac{Y_{aisl_p}}{a} + \frac{Y_{aisl_a}}{t} \end{bmatrix} \quad (30)$$

Siendo que la admitancia de la aislación entre cada elemento conductor del cable puede calcularse como:

$$Y_i = \frac{2\pi\omega\epsilon_0\epsilon_r}{\ln \left(\frac{r_{ext}}{r_{int}} \right)} (tg\delta + j1) \text{ siendo } tg\delta \text{ la tangente del ángulo de pérdidas dieléctricas del aislante.} \quad (31)$$

3. INTERFAZ GRÁFICA DEL PROGRAMA

Todos los cálculos descriptos hasta ahora son realizados en forma transparente para el usuario quien solo deberá interactuar con una interfaz gráfica para la carga y modificación de datos y visualización de resultados.

Al iniciar la rutina principal del programa, una primera interfaz solicita se indique el tipo de línea cuyos parámetros se quieren calcular, siendo las opciones: líneas aéreas o subterráneas. Seleccionada una de ellas, se pasa a otra interfaz que permitirá la carga y modificación de datos y parámetros de cálculo. Por razones de espacio solo se muestran, a modo de ejemplo, en la figura 4 dos de las interfaces correspondientes al cálculo de líneas trifásica subterráneas:

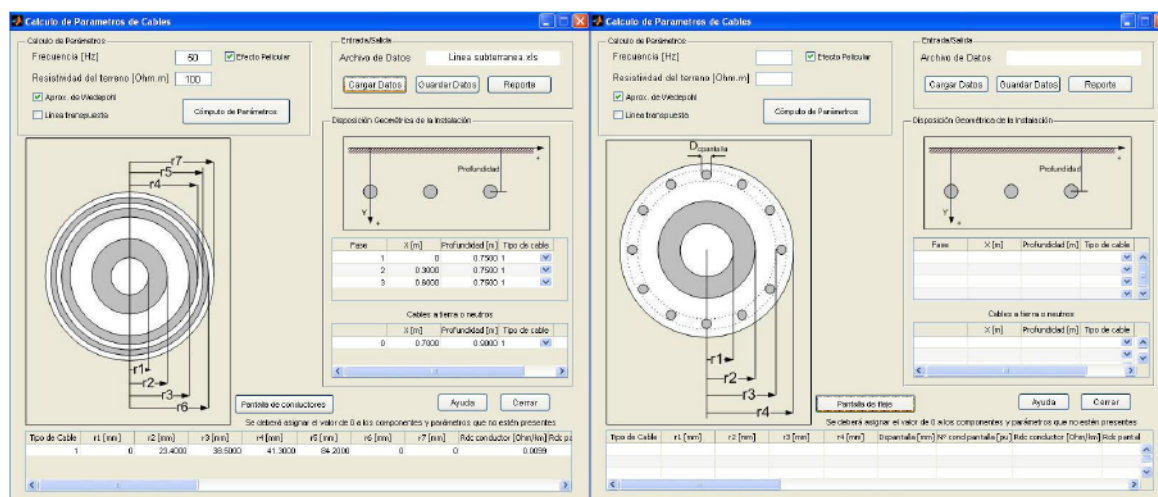


Figura 4 – Ejemplo de algunas de las interfaces gráficas del programa de cálculo para líneas subterráneas.

Como se aprecia los datos pueden ser introducidos directamente en la interfaz o leídos desde un archivo de planilla de cálculo, (para quien solicite el programa, se adjuntará un archivo de planilla de cálculo con el formato típico para la carga de datos a modo de demostración). De este modo el usuario no familiarizado con Matlab no debe preocuparse por generar archivos de datos en formato .mat.

Las características físicas del cable se determinan mediante la definición de los distintos radios, y cuando se introduce un valor cero en alguno de los radios r_3 en adelante, ello indica que el conductor o aislante correspondiente no están presentes en el cable. El programa asume que las fases de cada línea (sea aérea o subterránea) se identifican con números en orden correlativo, por lo que la ausencia de un número de identificación de fase indica la ausencia de una fase. Por ejemplo, si las fases de una línea se identifican con los números 1 y 3 significa que es una línea bifásica, donde la fase 2 no existe.

El programa se acompaña con un breve resumen de uso para su operación correcta a modo de manual de usuario, y por ello no se abunda sobre el tema en la presente contribución técnica.

Los resultados del programa han sido comparados satisfactoriamente con los presentados en la bibliografía citada y los obtenidos con otros software disponibles.

4. CONCLUSIÓN

Se ha presentado el marco teórico que ha servido de base para desarrollar un programa de cálculo digital, basado en Matlab, para el cómputo de parámetros de líneas aéreas y subterráneas para distintas frecuencias y resistividades de terreno.

Si bien Matlab es un lenguaje interpretado, la facilidad en la programación, aliado al potente conjunto de funciones disponibles y orientadas específicamente para este tipo de cálculos, hacen de él la opción a elegir. Por otro lado, la herramienta para la generación de interfaces gráficas en forma simple y rápida es un punto adicional a favor en la decisión del uso del soft. El programa es de código abierto por lo que estará disponible para quien lo solicite.

En el futuro se espera continuar el desarrollo del programa para incorporar el cálculo de parámetros modales.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Carson, John R. "Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return". Bell Systems Technical Journal, Vol 5, pag.539-554. 1926.
- [2] Dommel, Hermann W. et al. "Electro-Magnetic Transients Program (EMTP) – Theory Book". Branch of System Engineering Bonneville Power Administration, Portland, Oregon, USA. 1986.
- [3] Srivallipurandandan, Navaratnam. "Series Impedance and Shunt Admittance of an Underground Cable System". Master of Applied Science Thesis. University of British Columbia, Vancouver, Canada. 1986.
- [4] Wedepohl, L. M., Wilcox, D. J. "Transient Analysis of Underground Power-Transmission Systems. System-model and wave-propagation characteristics". Proceeding of the IEE, Vol. 120, No. 2, February 1973.
- [5] Kersting, Williams H. "Distribution Systems Modelling and Analysis". CRC Press. Boca Raton, Florida, USA. 2002.

- [6] Kagan, Nelson, Barioni de Oliveira, C. C., Robba, E. J. “*Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*”. Editora Edgard Blücher Ltda, Sao Paulo, SP, Brasil. 2005.
- [7] Anderson Paul M. “*Analysis of Faulted Power Systems*”. IEEE Press Power Engineering Series. Piscataway, New Jersey. 1995.
- [8] IEEE Working Group on Electromagnetic and Electrostatic Effects of Transmission Lines, General Systems Subcommittee. “*Electromagnetic Effects of Overhead Transmission Lines Practical Problems, Safeguards, and Methods of Calculation*”. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-93, pag. 900. May-June 1974.
- [9] Ametani, A. “*A General Formulation of Impedance and Admittance of Cables*”. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 3 May/June 1980.