

Projeto de Graduação



5 Dezembro, 2019

Cálculo dos parâmetros elétricos de uma linha de transmissão aérea

Clara Lemos de Moraes Lopes de Oliveira



www.ele.puc-rio.br

Cálculo dos parâmetros elétricos de uma linha de transmissão aérea

**Aluno(a): Clara Lemos de Moraes
Lopes de Oliveira**

Orientador: Mauro Schwanke da Silva

Trabalho requerido para a conclusão do curso de graduação em Engenharia Elétrica na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao meu orientador Mauro Schwanke pela oportunidade de realizar este trabalho, por todas as horas dedicadas a me atender, e por todo material disponibilizado por ele.

Gostaria de agradecer aos meus pais Mauricio e Juliana, e a minha irmã Luiza, pelo apoio durante toda minha formação.

Por fim, e não menos importante, gostaria de agradecer a todos os meus amigos, sem eles nada seria possível.

Cálculo dos parâmetros elétricos de uma linha de transmissão aérea

Resumo

Neste documento foi apresentado como calcular os parâmetros de uma linha de transmissão aérea. Para tal, será utilizado um método computacional. Assim, primeiramente foi mostrado o procedimento que o programa deve seguir, em seguida, aplicações do programa em linhas de transmissão aéreas reais, e, posteriormente, foi exemplificado algumas motivações para esse procedimento.

Para tal, foi mostrado como calcula-se a matriz de impedância série, a matriz de admitância “shunt”, o cálculo de impedância de sequência zero, sequência positiva, e negativa.

Palavras-chave: linha de transmissão, parâmetros, método computacional, matriz de impedância série, matriz de admitância “shunt”, sequência zero, sequência positiva, sequência negativa

Calculation of electrical parameters for overhead power lines

Abstract

The present paper shows how to calculate the parameters of an overhead transmission line. For this purpose, a computational method will be used. First, the procedure that the program should follow will be presented, followed by program applications on real overhead transmission lines. Finally, some motivations for this procedure will be exemplified.

The paper discussion contains the methods on how to calculate the series impedance matrix, the shunt admittance matrix, the zero sequence, the positive sequence, and the negative sequence impedance.

Keywords: Transmission Line, parameters, computational method, series impedance matrix, shunt admittance matrix, negative sequence, positive sequence, zero sequence

Sumário

1	Introdução	1
2	Formação da matriz impedância série	2
a	Circuito Simples	2
1	Redução de Kron	2
b	Circuito mais complexo	3
1	Eliminação de condutores Bundle na Matriz Impedância Série	4
3	Formação da Matriz Admitância "Shunt"	5
1	Remoção de Para-raio	5
2	Eliminação de condutores Bundle	5
4	Caso exemplo	6
a	Matriz de impedância série 14X14	6
b	Matriz de impedância série 3X3	7
c	Impedância por fase	7
1	Sequência Positiva e Negativa	7
2	Sequência Zero	8
d	Matriz admitância "shunt" 14X14	8
e	Matriz de admitância "shunt" 3X3	9
f	Admitância por fase	9
1	Sequencia positiva e negativa	9
2	Sequencia zero	9
g	Verificação	9
5	Aplicação em linhas de transmissão	11
a	Interligação Sudeste - Nordeste	11
1	Matriz impedância série 14X14	12
2	Matriz impedância série 3X3	13
3	Impedância por fase	13
4	Sequência Positiva e Negativa	13
5	Sequência Zero	14
b	Matriz admitância "shunt" 14X14	15
1	Matriz admitância "shunt" 3X3	15
2	Admitância por fase	16
3	Sequencia positiva e negativa	16
4	Sequencia zero	16
6	Aplicações	17
7	Conclusão	20
A	Appendix	22
a	Código do caso exemplo	22
b	Código Matlab - Interligação Sudestes Nordeste	27
c	Código de Matlab sobre aplicações	32

Lista de Figuras

1	Circuito Simples	2
2	Circuito mais complexo	3
3	Tabela retirada do livro " Transmissão de Energia Elétrica" de Rubens Dario Fuchs	10
4	Interligação Sudeste Nordeste	11
5	Torre utilizada com medidas entre os condutores	12
6	Circuito para cálculo de curto-circuito	17

Lista de Tabelas

1	Dados condutores-Caso exemplo	6
2	Dados da linha- Caso exemplo	6
3	Subestações	11
4	Dados da linha- Sudeste Nordeste	11
5	Dados do Circuito	17

1 Introdução

As linhas de transmissão são parte essencial do sistema de energia elétrica. Elas possibilitam o transporte de energia da fonte de geração até a unidade consumidora.

Para a construção de uma linha é necessário que seja calculado previamente todos os parâmetros a serem utilizados. Esse cálculo é elaborado a partir da construção da matriz de impedância série e da matriz de impedância shunt.

Para tal, será necessário o uso de um método computacional que obtenha os parâmetros de uma linha de transmissão com o menor número de simplificações possível.

Assim, será mostrado o procedimento matemático necessário para fazer o programa de Matlab que irá calcular os parâmetros da linha de transmissão. Posteriormente, será mostrado algumas aplicações do programa.

2 Formação da matriz impedância série

Para efeitos de se obter uma demonstração mais eficaz, serão mostrados a seguir diversos exemplos de como se obter a matriz de impedância série.

a Circuito Simples

Esse circuito é composto por bundles simples e apenas quatro fios, três fases e um terra.

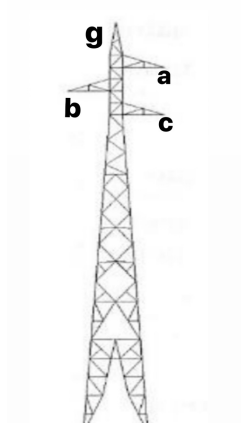


Figure 1: Circuito Simples

Pode-se facilmente montar a matriz de impedância série :

$$Z_{abcg} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{ag} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bg} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cg} \\ Z_{ga} & Z_{gb} & Z_{gc} & Z_{gg} \end{bmatrix}$$

Uma vez montada a matriz impedância série deve-se realizar uma redução de Kron para transforma-la numa matriz 3X3. Ou seja, a linha correspondente ao terra será retirada e terá seu valor compensado nas demais linhas.

1 Redução de Kron

A redução de Kron é um método matemático, que funciona da seguinte forma:

Seja um sistema linear :

$$Y = AX \tag{1}$$

ou :

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix}$$

Sabe-se que para o caso do para-raio $Y_4 = 0$. Logo:

$$0 = a_{41}x_1 + a_{42}x_2 + a_{43}x_3 + a_{44}x_4$$

$$(2) \quad x_4 = \frac{-1}{a_{44}} * (a_{41}x_1 + a_{42}x_2 + a_{43}x_3)$$

Substituindo x_4 nas equações:

$$Y_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + a_{14} \frac{-1}{a_{44}} (a_{41}x_1 + a_{42}x_2 + a_{43}x_3)$$

$$Y_1 = (a_{11} - \frac{a_{14}a_{41}}{a_{44}})x_1 + (a_{12} - \frac{a_{14}a_{42}}{a_{44}})x_2 + (a_{13} - \frac{a_{14}a_{43}}{a_{44}})x_3 \quad (3)$$

De modo analogo realiza-se o mesmo para Y_2 e Y_3 . Logo, obtem-se uma matriz reduzida, de tamanho 3X3, cujos termos são:

$$a_{ij} = (a_{ij} - \frac{a_{i4}a_{4j}}{a_{44}}) \quad (4)$$

De forma genérica, para um sistema de proporção $n \times n$ e $Y_p = 0$, a matriz reduzida teria seus elementos dados por:

$$a_{ij} = (a_{ij} - \frac{a_{ip}a_{pj}}{a_{pp}}) \quad (5)$$

Para o caso de mais de um para-raio no sistema, é possível aplicar a redução anterior sucessivas vezes.

b Circuito mais complexo

A seguir, será mostrado o caso de um circuito mais complexo, que será usado para mostrar como deve-se ser realizada a eliminação de condutores "bundle".

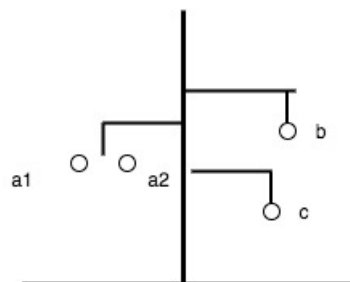


Figure 2: Circuito mais complexo

Os condutores a_1 e a_2 constituem a fase a da linha de transmissão. Logo:

$$V_{a1} = V_{a2} \quad (6)$$

1 Eliminação de condutores Bundle na Matriz Impedância Série

Como a_1 e a_2 estão paralelo:

$$\begin{bmatrix} V_{a1} \\ V_b \\ V_c \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{a_1 a_1} & Z_{a_1 b} & Z_{a_1 c} & Z_{a_1 a_2} \\ Z_{b a_1} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{b a_2} \\ Z_{c a_1} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{c a_2} \\ (Z_{a_2 a_1} - Z_{a_1 a_1}) & (Z_{a_2 b} - Z_{a_1 b}) & (Z_{a_2 c} - Z_{a_1 c}) & (Z_{a_2 a_2} - Z_{a_1 a_2}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_b \\ I_c \\ I_{a2} \end{bmatrix}$$

$$V_{a1} = Z_{a_1 a_1} I_{a1} + Z_{a_1 b} I_b + Z_{a_1 c} I_c + Z_{a_1 a_2} I_{a2} \quad (7)$$

Além disso, sabe-se que $I_a = I_{a1} + I_{a2}$, logo, é possível escrever :

$$V_{a1} = Z_{a_1 a_1} (I_{a1} + I_{a2}) + Z_{a_1 b} I_b + Z_{a_1 c} I_c + (Z_{a_1 a_2} - Z_{a_1 a_1}) I_{a2} \quad (8)$$

Substituindo na matriz:

$$\begin{bmatrix} V_{a1} \\ V_b \\ V_c \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{a_1 a_1} & Z_{a_1 b} & Z_{a_1 c} & Z_{a_1 a_2} - Z_{a_1 a_1} \\ Z_{b a_1} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{b a_2} - Z_{b a_1} \\ Z_{c a_1} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{c a_2} - Z_{c a_1} \\ (Z_{a_2 a_1} - Z_{a_1 a_1}) & (Z_{a_2 b} - Z_{a_1 b}) & (Z_{a_2 c} - Z_{a_1 c}) & (Z_{a_2 a_2} - Z_{a_1 a_2} - Z_{a_2 a_1} + Z_{a_1 a_1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_b \\ I_c \\ I_{a2} \end{bmatrix}$$

A partir da matriz, apresentada acima, nota-se :

$$Z_{a_1 a_1} = Z_{a_2 a_2} Z_{a_1 a_2} = Z_{a_2 a_1} \quad (9)$$

Portanto:

$$Z_{a_2 a_2} - Z_{a_1 a_2} - Z_{a_2 a_1} + Z_{a_1 a_1} = 2(Z_{a_1 a_1} - Z_{a_1 a_2}) \quad (10)$$

Com a matriz montada, como acima, é possível torna-la uma matriz de dimensão 3X3, através da redução de Kron. Assim, o primeiro termo dessa matriz seria:

$$Z'_{a_1 a_1} = Z_{a_1 a_1} - \frac{(Z_{a_2 a_1} - Z_{a_1 a_1})^2}{2(Z_{a_1 a_1} - Z_{a_1 a_2})} \quad (11)$$

3 Formação da Matriz Admitância "Shunt"

A matriz admitância "Shunt" (Y_{shunt}) é encontrada a partir de :

$$\begin{aligned} V &= PQ \\ Q &= P^{-1}V \\ Q &= CV \end{aligned} \quad (12)$$

Logo:

$$\begin{aligned} C &= P^{-1} \\ Y_{shunt} &= j\omega C = j\omega P^{-1} \end{aligned} \quad (13)$$

A matriz P é montada de forma análoga a matriz "Z" - matriz de impedância série . Ou seja, deve-se montar a matriz P e posteriormente reduzi-la em uma matriz de proporção 3X3, da mesma forma como mostrado anteriormente. Em seguida, a partir da inversão da matriz P, acha-se a matriz admitância Y_{shunt} .

1 Remoção de Para-raio

Logo, para a remoção de para-raios procede-se da seguinte forma:

Considerando o para-raio aterrado em todas estruturas: $V_g = 0$, sendo V_g a tensão do para-raio.

Assim, a partir do circuito simples apresentado :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ 0 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} Q_a \\ Q_b \\ Q_c \\ Q_g \end{bmatrix}$$

A partir do mostrado no caso da matriz impedância série , pode-se observar que realiza-se um cálculo semelhante ao mostrado para eliminação de para-raios.

2 Eliminação de condutores Bundle

Fazendo uso do Circuito mais Complexo, com dois condutores na fase " a " .

Considerando " a_1 " e " a_2 " em paralelo:

$$q_a = q_{a_1} + q_{a_2} V_{a_1} = V_{a_2} = V_a \quad (14)$$

Assim, realiza-se a redução de forma semelhante ao caso da matriz impedância série.

4 Caso exemplo

A seguir, será apresentado como realizar o cálculo de parâmetros de uma linha de transmissão aérea, através de um exemplo didático.

A partir de uma torre de transmissão de quatro condutores por fase e dois para-raios. Com os seguintes espaçamentos:

Espaçamento entre condutores da mesma fase	18"
Espaçamento entre fases	12'
Distância condutores e solo	25'
Espaçamento entre para-raios	17'
Distância entre condutores e para-raios	8'

Table 1: Dados condutores-Caso exemplo

Dados da linha:

Classe de tensão	500 Kv
Frequência	60Hz
Condutores	"bundle", formados por 4 subcondutores ACSR, 636 MCM, formação 26/7
Raio condutores	0,1057 Ω/Km
Para-raios	2 para-raios de aço, diâmetro 0.5 polegadas, GMR = 0,0049469 m
Raio dos para-raios	2,4860 Ω/Km

Table 2: Dados da linha- Caso exemplo

a Matriz de impedância série 14X14

A partir dos dados apresentados da linha, é calculada a matriz de impedância série (14X14), a partir do programa feito em matlab, obtendo-se:

Colunas 1 a 4:

$0.1057 + 0.6687i$	$0.0000 + 0.1432i$	$0.0000 + 0.0934i$	$0.0000 + 0.3194i$
$0.0000 + 0.1432i$	$0.1057 + 0.6687i$	$0.0000 + 0.1432i$	$0.0000 + 0.1507i$
$0.0000 + 0.0934i$	$0.0000 + 0.1432i$	$0.1057 + 0.6687i$	$0.0000 + 0.0968i$
$0.0000 + 0.0934i$	$0.0000 + 0.1432i$	$0.1057 + 0.6687i$	$0.0000 + 0.0968i$
$0.0000 + 0.3194i$	$0.0000 + 0.1507i$	$0.0000 + 0.0968i$	$0.1057 + 0.6687i$
$0.0000 + 0.1365i$	$0.0000 + 0.3194i$	$0.0000 + 0.1507i$	$0.0000 + 0.1432i$
$0.0000 + 0.0902i$	$0.0000 + 0.1365i$	$0.0000 + 0.3194i$	$0.0000 + 0.0934i$
$0.0000 + 0.3204i$	$0.0000 + 0.1440i$	$0.0000 + 0.0943i$	$0.0000 + 0.2943i$
$0.0000 + 0.3204i$	$0.0000 + 0.1440i$	$0.0000 + 0.0943i$	$0.0000 + 0.2943i$
$0.0000 + 0.1440i$	$0.0000 + 0.3204i$	$0.0000 + 0.1440i$	$0.0000 + 0.1513i$
$0.0000 + 0.0943i$	$0.0000 + 0.1440i$	$0.0000 + 0.3204i$	$0.0000 + 0.0977i$
$0.0000 + 0.2943i$	$0.0000 + 0.1513i$	$0.0000 + 0.0977i$	$0.0000 + 0.3204i$
$0.0000 + 0.1373i$	$0.0000 + 0.2943i$	$0.0000 + 0.1513i$	$0.0000 + 0.1440i$
$0.0000 + 0.0911i$	$0.0000 + 0.1373i$	$0.0000 + 0.2943i$	$0.0000 + 0.0943i$
$0.0000 + 0.1593i$	$0.0000 + 0.1430i$	$0.0000 + 0.1040i$	$0.0000 + 0.1613i$
$0.0000 + 0.1010i$	$0.0000 + 0.1389i$	$0.0000 + 0.1613i$	$0.0000 + 0.1040i$

Colunas 5 a 9:

0.0000 + 0.1365i	0.0000 + 0.0902i	0.0000 + 0.3204i	0.0000 + 0.1440i	0.0000 + 0.0943i
0.0000 + 0.3194i	0.0000 + 0.1365i	0.0000 + 0.1440i	0.0000 + 0.3204i	0.0000 + 0.1440i
0.0000 + 0.1507i	0.0000 + 0.3194i	0.0000 + 0.0943i	0.0000 + 0.1440i	0.0000 + 0.3204i
0.0000 + 0.1432i	0.0000 + 0.0934i	0.0000 + 0.2943i	0.0000 + 0.1513i	0.0000 + 0.0977i
0.1057 + 0.6687i	0.0000 + 0.1432i	0.0000 + 0.1373i	0.0000 + 0.2943i	0.0000 + 0.1513i
0.0000 + 0.1432i	0.1057 + 0.6687i	0.0000 + 0.0911i	0.0000 + 0.1373i	0.0000 + 0.2943i
0.0000 + 0.1373i	0.0000 + 0.0911i	0.1057 + 0.6709i	0.0000 + 0.1453i	0.0000 + 0.0954i
0.0000 + 0.2943i	0.0000 + 0.1373i	0.0000 + 0.1453i	0.1057 + 0.6709i	0.0000 + 0.1453i
0.0000 + 0.1513i	0.0000 + 0.2943i	0.0000 + 0.0954i	0.0000 + 0.1453i	0.1057 + 0.6709i
0.0000 + 0.1440i	0.0000 + 0.0943i	0.0000 + 0.3215i	0.0000 + 0.1528i	0.0000 + 0.0988i
0.0000 + 0.3204i	0.0000 + 0.1440i	0.0000 + 0.1386i	0.0000 + 0.3215i	0.0000 + 0.1528i
0.0000 + 0.1440i	0.0000 + 0.3204i	0.0000 + 0.0922i	0.0000 + 0.1386i	0.0000 + 0.3215i
0.0000 + 0.1389i	0.0000 + 0.1010i	0.0000 + 0.1683i	0.0000 + 0.1489i	0.0000 + 0.1066i
0.0000 + 0.1430i	0.0000 + 0.1593i	0.0000 + 0.1033i	0.0000 + 0.1443i	0.0000 + 0.1708i

Colunas 10 a 14:

0.0000 + 0.2943i	0.0000 + 0.1373i	0.0000 + 0.0911i	0.0000 + 0.1593i	0.0000 + 0.1010i
0.0000 + 0.1513i	0.0000 + 0.2943i	0.0000 + 0.1373i	0.0000 + 0.1430i	0.0000 + 0.1389i
0.0000 + 0.0977i	0.0000 + 0.1513i	0.0000 + 0.2943i	0.0000 + 0.1040i	0.0000 + 0.1613i
0.0000 + 0.3204i	0.0000 + 0.1440i	0.0000 + 0.0943i	0.0000 + 0.1613i	0.0000 + 0.1040i
0.0000 + 0.1440i	0.0000 + 0.3204i	0.0000 + 0.1440i	0.0000 + 0.1389i	0.0000 + 0.1430i
0.0000 + 0.0943i	0.0000 + 0.1440i	0.0000 + 0.3204i	0.0000 + 0.1010i	0.0000 + 0.1593i
0.0000 + 0.3215i	0.0000 + 0.1386i	0.0000 + 0.0922i	0.0000 + 0.1683i	0.0000 + 0.1033i
0.0000 + 0.1528i	0.0000 + 0.3215i	0.0000 + 0.1386i	0.0000 + 0.1489i	0.0000 + 0.1443i
0.0000 + 0.0988i	0.0000 + 0.1528i	0.0000 + 0.3215i	0.0000 + 0.1066i	0.0000 + 0.1708i
0.1057 + 0.6709i	0.0000 + 0.1453i	0.0000 + 0.0954i	0.0000 + 0.1708i	0.0000 + 0.1066i
0.0000 + 0.1453i	0.1057 + 0.6709i	0.0000 + 0.1453i	0.0000 + 0.1443i	0.0000 + 0.1489i
0.0000 + 0.0954i	0.0000 + 0.1453i	0.1057 + 0.6709i	0.0000 + 0.1033i	0.0000 + 0.1683i
0.0000 + 0.1708i	0.0000 + 0.1443i	0.0000 + 0.1033i	2.4860 + 0.7443i	0.0000 + 0.1282i
0.0000 + 0.1066i	0.0000 + 0.1489i	0.0000 + 0.1683i	0.0000 + 0.1282i	2.4860 + 0.7443i

b Matriz de impedância série 3X3

Realizando os métodos de redução, explicitados anteriormente, foi obtido:

$$\begin{bmatrix} 0.1095 + 0.6676i & 0.0052 + 0.1417i & 0.0061 + 0.0904i \\ 0.0052 + 0.1417i & 0.1128 + 0.6665i & 0.0085 + 0.1377i \\ 0.0061 + 0.0904i & 0.0085 + 0.1377i & 0.0629 + 0.4790i \end{bmatrix}$$

c Impedância por fase

A partir da matriz de impedância série (3X3) pode-se calcular a impedância por fase. Sabe-se que a impedância mútua são os elementos fora da diagonal principal, e a impedância própria os elementos da diagonal principal da matriz. A partir da seguinte equação:

1 Sequência Positiva e Negativa

$$Z_{fase} = Z_{propria} - Z_{mutua} \quad (15)$$

Em que foi encontrado o seguinte valor: $0.0885 + 0.4811i$

2 Sequência Zero

$$Z_{fase} = Z_{propria} + 2 * Z_{mutua} \quad (16)$$

Em que foi encontrado o seguinte valor: $0.1083 + 0.8510i$

d Matriz admitância "shunt" 14X14

Colunas 1 a 4:

$1.0e - 05*$

$0.0000 + 0.3873i$	$0.0000 - 0.0084i$	$0.0000 - 0.0027i$	$0.0000 - 0.1017i$
$0.0000 - 0.0084i$	$0.0000 + 0.3906i$	$0.0000 - 0.0081i$	$0.0000 - 0.0112i$
$0.0000 - 0.0027i$	$0.0000 - 0.0081i$	$0.0000 + 0.3891i$	$0.0000 - 0.0031i$
$0.0000 - 0.1017i$	$0.0000 - 0.0112i$	$0.0000 - 0.0031i$	$0.0000 + 0.3891i$
$0.0000 - 0.0063i$	$0.0000 - 0.0994i$	$0.0000 - 0.0112i$	$0.0000 - 0.0081i$
$0.0000 - 0.0024i$	$0.0000 - 0.0063i$	$0.0000 - 0.1017i$	$0.0000 - 0.0027i$
$0.0000 - 0.1023i$	$0.0000 - 0.0079i$	$0.0000 - 0.0026i$	$0.0000 - 0.0621i$
$0.0000 - 0.0079i$	$0.0000 - 0.0991i$	$0.0000 - 0.0075i$	$0.0000 - 0.0105i$
$0.0000 - 0.0026i$	$0.0000 - 0.0075i$	$0.0000 - 0.1004i$	$0.0000 - 0.0029i$
$0.0000 - 0.0621i$	$0.0000 - 0.0105i$	$0.0000 - 0.0029i$	$0.0000 - 0.1004i$
$0.0000 - 0.0059i$	$0.0000 - 0.0599i$	$0.0000 - 0.0105i$	$0.0000 - 0.0075i$
$0.0000 - 0.0023i$	$0.0000 - 0.0059i$	$0.0000 - 0.0621i$	$0.0000 - 0.0026i$
$0.0000 - 0.0157i$	$0.0000 - 0.0111i$	$0.0000 - 0.0052i$	$0.0000 - 0.0158i$
$0.0000 - 0.0048i$	$0.0000 - 0.0092i$	$0.0000 - 0.0158i$	$0.0000 - 0.0052i$

Colunas 5 a 9:

$1.0e - 05*$

$0.0000 - 0.0063i$	$0.0000 - 0.0024i$	$0.0000 - 0.1023i$	$0.0000 - 0.0079i$	$0.0000 - 0.0026i$
$0.0000 - 0.0994i$	$0.0000 - 0.0063i$	$0.0000 - 0.0079i$	$0.0000 - 0.0991i$	$0.0000 - 0.0075i$
$0.0000 - 0.0112i$	$0.0000 - 0.1017i$	$0.0000 - 0.0026i$	$0.0000 - 0.0075i$	$0.0000 - 0.1004i$
$0.0000 - 0.0081i$	$0.0000 - 0.0027i$	$0.0000 - 0.0621i$	$0.0000 - 0.0105i$	$0.0000 - 0.0029i$
$0.0000 + 0.3906i$	$0.0000 - 0.0084i$	$0.0000 - 0.0059i$	$0.0000 - 0.0599i$	$0.0000 - 0.0105i$
$0.0000 - 0.0084i$	$0.0000 + 0.3873i$	$0.0000 - 0.0023i$	$0.0000 - 0.0059i$	$0.0000 - 0.0621i$
$0.0000 - 0.0059i$	$0.0000 - 0.0023i$	$0.0000 + 0.3878i$	$0.0000 - 0.0081i$	$0.0000 - 0.0026i$
$0.0000 - 0.0599i$	$0.0000 - 0.0059i$	$0.0000 - 0.0081i$	$0.0000 + 0.3909i$	$0.0000 - 0.0077i$
$0.0000 - 0.0105i$	$0.0000 - 0.0621i$	$0.0000 - 0.0026i$	$0.0000 - 0.0077i$	$0.0000 + 0.3898i$
$0.0000 - 0.0075i$	$0.0000 - 0.0026i$	$0.0000 - 0.1011i$	$0.0000 - 0.0108i$	$0.0000 - 0.0030i$
$0.0000 - 0.0991i$	$0.0000 - 0.0079i$	$0.0000 - 0.0061i$	$0.0000 - 0.0991i$	$0.0000 - 0.0108i$
$0.0000 - 0.0079i$	$0.0000 - 0.1023i$	$0.0000 - 0.0023i$	$0.0000 - 0.0061i$	$0.0000 - 0.1011i$
$0.0000 - 0.0092i$	$0.0000 - 0.0048i$	$0.0000 - 0.0213i$	$0.0000 - 0.0145i$	$0.0000 - 0.0060i$
$0.0000 - 0.0111i$	$0.0000 - 0.0157i$	$0.0000 - 0.0056i$	$0.0000 - 0.0121i$	$0.0000 - 0.0218i$

Colunas 10 a 14:

$0.0000 - 0.0063i$	$0.0000 - 0.0024i$	$0.0000 - 0.1023i$	$0.0000 - 0.0079i$	$0.0000 - 0.0026i$
$0.0000 - 0.0994i$	$0.0000 - 0.0063i$	$0.0000 - 0.0079i$	$0.0000 - 0.0991i$	$0.0000 - 0.0075i$
$0.0000 - 0.0112i$	$0.0000 - 0.1017i$	$0.0000 - 0.0026i$	$0.0000 - 0.0075i$	$0.0000 - 0.1004i$
$0.0000 - 0.0081i$	$0.0000 - 0.0027i$	$0.0000 - 0.0621i$	$0.0000 - 0.0105i$	$0.0000 - 0.0029i$
$0.0000 + 0.3906i$	$0.0000 - 0.0084i$	$0.0000 - 0.0059i$	$0.0000 - 0.0599i$	$0.0000 - 0.0105i$
$0.0000 - 0.0084i$	$0.0000 + 0.3873i$	$0.0000 - 0.0023i$	$0.0000 - 0.0059i$	$0.0000 - 0.0621i$
$0.0000 - 0.0059i$	$0.0000 - 0.0023i$	$0.0000 + 0.3878i$	$0.0000 - 0.0081i$	$0.0000 - 0.0026i$
$0.0000 - 0.0599i$	$0.0000 - 0.0059i$	$0.0000 - 0.0081i$	$0.0000 + 0.3909i$	$0.0000 - 0.0077i$
$0.0000 - 0.0105i$	$0.0000 - 0.0621i$	$0.0000 - 0.0026i$	$0.0000 - 0.0077i$	$0.0000 + 0.3898i$
$0.0000 - 0.0075i$	$0.0000 - 0.0026i$	$0.0000 - 0.1011i$	$0.0000 - 0.0108i$	$0.0000 - 0.0030i$
$0.0000 - 0.0991i$	$0.0000 - 0.0079i$	$0.0000 - 0.0061i$	$0.0000 - 0.0991i$	$0.0000 - 0.0108i$
$0.0000 - 0.0079i$	$0.0000 - 0.1023i$	$0.0000 - 0.0023i$	$0.0000 - 0.0061i$	$0.0000 - 0.1011i$
$0.0000 - 0.0092i$	$0.0000 - 0.0048i$	$0.0000 - 0.0213i$	$0.0000 - 0.0145i$	$0.0000 - 0.0060i$
$0.0000 - 0.0111i$	$0.0000 - 0.0157i$	$0.0000 - 0.0056i$	$0.0000 - 0.0121i$	$0.0000 - 0.0218i$

e Matriz de admitancia "shunt" 3X3

$1.0e - 05*$

$$\begin{bmatrix} 0.0000 + 0.2635i & 0.0000 - 0.0476i & 0.0000 - 0.0305i \\ 0.0000 - 0.0476i & 0.0000 + 0.2763i & 0.0000 - 0.0622i \\ 0.0000 - 0.0305i & 0.0000 - 0.0622i & 0.0000 + 0.3854i \end{bmatrix}$$

f Admitância por fase

A partir da matriz de Admitância "shunt" (3X3) pode-se calcular a admitância por fase. Sabe-se que a admitância mútua são os elementos fora da diagonal principal, e a admitância própria os elementos da diagonal principal da matriz. A partir da seguinte equação:

1 Sequencia positiva e negativa

$$Y_{fase} = Y_{propria} + Y_{mutua} \quad (17)$$

Em que foi encontrado o seguinte valor: $2.6162e - 06i$

2 Sequencia zero

$$Y_{fase} = Y_{propria} - 2 * Y_{mutua} \quad (18)$$

Em que foi encontrado o seguinte valor: $4.0193e - 06i$

g Verificação

Pode-se comprovar a eficácia do método ao comparar o valor de impedância por fase encontrado ao valor tabelado:

Tabela II.3 — Características Elétricas — Cabos de Alumínio-Aço (CAA)

Código	Bitola		Raio médio geométrico a 60 (Hz) (m)	Resistência a 25°C			Resistência a 50°C			Reatância indutiva		Reatância capacitiva		corrente máxima admissível a 60 Hz (A)
	MCM	AWG		Cor. pequenas x			Cor. apr. 75% Cor. máx. adm.			x'L a 1 (m)		x'c a 1 (m)		
				CC	50 Hz	60 Hz	CC	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	
			Ohm/Cond /km			Ohm/Cond./km			MegOhm · Cond./km					
Falcon	1 590		0,01584	0,03648	0,0366	0,0367	0,04014	0,04195	0,0425	0,260495	0,312594	0,22522	0,18768	1,380
Parrot	1 510,5		0,01545	0,03840	0,0385	0,0386	0,04226	0,04412	0,0447	0,262062	0,314474	0,22668	0,18890	1,340
Plover	1 431		0,01502	0,04052	0,0407	0,0407	0,04462	0,04655	0,0472	0,263835	0,316602	0,22826	0,19022	1,300
Martin	1 321,5		0,01459	0,04294	0,0431	0,0431	0,04729	0,04922	0,0499	0,265618	0,318741	0,22989	0,19157	1,250
Pheasant	1 272,0		0,01417	0,04561	0,0458	0,0458	0,05021	0,0522	0,0528	0,267303	0,320836	0,23161	0,19300	1,200
Grackle	1 192,5		0,01371	0,04866	0,0488	0,0489	0,05357	0,0555	0,0563	0,269570	0,323484	0,23346	0,19455	1,160
Finch	1 113		0,01325	0,05214	0,0523	0,0524	0,05742	0,0594	0,0602	0,271715	0,326058	0,23542	0,19618	1,110
Curlew	1 033,5		0,01280	0,05612	0,0563	0,0564	0,06177	0,0637	0,0643	0,273886	0,328664	0,23754	0,19795	1,060
Cardinal	954		0,01228	0,06084	0,0609	0,0610	0,06699	0,0694	0,0701	0,276390	0,331668	0,23989	0,19990	1,010
Canary	900		0,01191	0,06463	0,0646	0,0646	0,07116	0,0730	0,0736	0,278468	0,334162	0,24154	0,20128	970
Crane	874,5		0,01176	0,06650	0,0665	0,0671	0,07321	0,0756	0,0763	0,279533	0,335440	0,24233	0,20194	950
Condor	795,0		0,01121	0,07271	0,0733	0,0739	0,08004	0,0843	0,0856	0,282278	0,338733	0,24505	0,20420	900
Drake	795,0		0,01143	0,07271	0,0727	0,0727	0,08004	0,0800	0,0800	0,281165	0,337398	0,24427	0,20355	900
Mallard	795,0		0,01197	0,07271	0,0727	0,0727	0,08004	0,0800	0,0800	0,277942	0,333530	0,24263	0,20219	910
Crow	715,5		0,01083	0,08141	0,0814	0,0820	0,08962	0,0914	0,0921	0,285738	0,342885	0,24812	0,20676	830
Starling	715,5		0,01082	0,08141	0,0814	0,0814	0,08962	0,0896	0,0896	0,284563	0,341476	0,24729	0,20608	840
Redwing	715,5		0,01133	0,08141	0,0814	0,0814	0,08962	0,0896	0,0896	0,281719	0,338063	0,24568	0,20473	840
Gull	666,6		0,01027	0,08701	0,0876	0,0876	0,09577	0,0988	0,0995	0,287542	0,340500	0,25014	0,20845	800
Goose	636		0,01002	0,09136	0,0919	0,0919	0,10055	0,1042	0,1049	0,289400	0,347280	0,25148	0,20956	770
Grosbeak	636		0,01021	0,09136	0,0913	0,0913	0,10055	0,1005	0,1005	0,288155	0,345785	0,25072	0,20893	780
Egret	636		0,01069	0,09136	0,0913	0,0913	0,10055	0,1005	0,1005	0,285148	0,342177	0,24906	0,20755	780
Duck	605		0,00978	0,09571	0,0963	0,0963	0,10534	0,1090	0,1103	0,290797	0,348957	0,25290	0,21075	750
Squab	605		0,00996	0,09571	0,0957	0,0957	0,10565	0,1068	0,1068	0,289589	0,347505	0,25212	0,21010	760
Dove	556,5		0,00954	0,10411	0,1044	0,1044	0,11491	0,1155	0,1155	0,292358	0,350830	0,25449	0,21207	730

Figure 3: Tabela retirada do livro " Transmissão de Energia Elétrica" de Rubens Dario Fuchs

Observando a tabela, acima, é possível observar que os valores calculados se aproximam , de forma suficiente a comprovar o método.

5 Aplicação em linhas de transmissão

Nesta seção foi mostrado como encontrar a matriz de impedância série e a matriz de admitância "shunt", a partir dos métodos apresentados acima, em exemplos reais de linhas de transmissão.

a Interligação Sudeste - Nordeste

Esta linha de transmissão de 500KV conecta a subestação de Serra da Mesa a subestação de Governador Mangabeira. Contemplando três subestações intermediárias. Como mostrado abaixo:

Origem	Destino	Comprimento (Km)
Serrada Mesa	Rio das Éguas	294
Rio das Éguas	B. J. da Lapa	250
B. J. da Lapa	Mucugé	255
Mucugé	Gov. Mangabeira	251

Table 3: Subestações

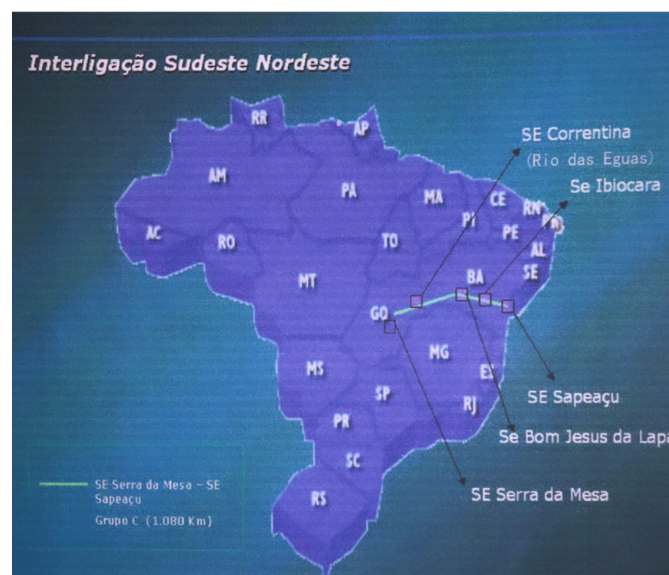


Figure 4: Interligação Sudeste Nordeste

Dados utilizados no cálculo dos parâmetros elétricos:

Tipo de Cabo Condutor	CAA, Rail 954 MCM , 45/7
Tipo de Cabo Para - Raio	EAR, aço galvanizado, 3/8" - 7 fios
Número de sub-condutores por fase	4 - feixe expandido
Espaçamento entre os sub-condutores	1,1 m
Resistência do condutor	$0,017525 \, \Omega / \text{Km}$
Resistência do para-raio	$4,101 \, \Omega / \text{Km}$
RMG do condutor	0,0118 m
RMG do para-raio	$27357,2 \cdot 10^{-12} \, \text{m}$
Diâmetro do condutor	0,02959 m
Diâmetro do para-raio	0,009525 m

Table 4: Dados da linha- Sudeste Nordeste

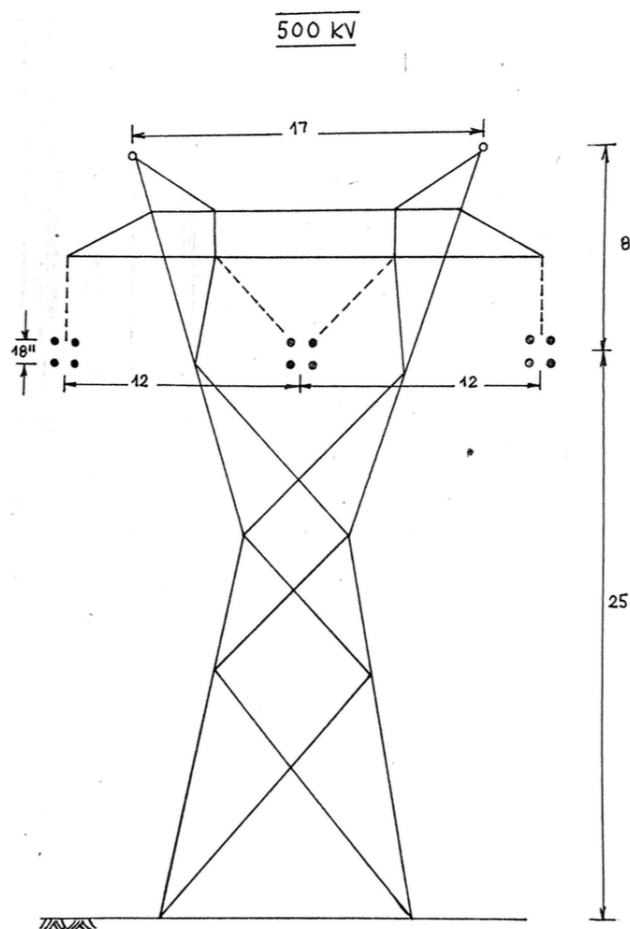


Figure 5: Torre utilizada com medidas entre os condutores

Assim, a partir do programa , foi calculada a seguinte matriz impedância série, a partir das distâncias entre os condutores e o número destes, apresentados anteriormente.

1 Matriz impedância série 14X14

Para este cálculo foi considerado o solo plano e homogêneo, a linha como sendo constituída de condutores paralelos entre si e ao solo, e foi desprezado o efeito das torres no campo magnético e o efeito coroa.

Colunas 1 a 4:

$0.0175 + 0.6613i$	$0.0000 + 0.1432i$	$0.0000 + 0.0934i$	$0.0000 + 0.3194i$
$0.0000 + 0.1432i$	$0.0175 + 0.6613i$	$0.0000 + 0.1432i$	$0.0000 + 0.1507i$
$0.0000 + 0.0934i$	$0.0000 + 0.1432i$	$0.0175 + 0.6613i$	$0.0000 + 0.0968i$
$0.0000 + 0.3194i$	$0.0000 + 0.1507i$	$0.0000 + 0.0968i$	$0.0175 + 0.6613i$
$0.0000 + 0.1365i$	$0.0000 + 0.3194i$	$0.0000 + 0.1507i$	$0.0000 + 0.1432i$
$0.0000 + 0.0902i$	$0.0000 + 0.1365i$	$0.0000 + 0.3194i$	$0.0000 + 0.0934i$
$0.0000 + 0.3204i$	$0.0000 + 0.1440i$	$0.0000 + 0.0943i$	$0.0000 + 0.2943i$
$0.0000 + 0.1440i$	$0.0000 + 0.3204i$	$0.0000 + 0.1440i$	$0.0000 + 0.1513i$
$0.0000 + 0.0943i$	$0.0000 + 0.1440i$	$0.0000 + 0.3204i$	$0.0000 + 0.0977i$
$0.0000 + 0.2943i$	$0.0000 + 0.1513i$	$0.0000 + 0.0977i$	$0.0000 + 0.3204i$
$0.0000 + 0.1373i$	$0.0000 + 0.2943i$	$0.0000 + 0.1513i$	$0.0000 + 0.1440i$
$0.0000 + 0.0911i$	$0.0000 + 0.1373i$	$0.0000 + 0.2943i$	$0.0000 + 0.0943i$
$0.0000 + 0.1593i$	$0.0000 + 0.1430i$	$0.0000 + 0.1040i$	$0.0000 + 0.1613i$
$0.0000 + 0.1010i$	$0.0000 + 0.1389i$	$0.0000 + 0.1613i$	$0.0000 + 0.1040i$

Colunas 5 a 9:

$0.0000 + 0.1365i$	$0.0000 + 0.0902i$	$0.0000 + 0.3204i$	$0.0000 + 0.1440i$	$0.0000 + 0.0943i$
$0.0000 + 0.3194i$	$0.0000 + 0.1365i$	$0.0000 + 0.1440i$	$0.0000 + 0.3204i$	$0.0000 + 0.1440i$
$0.0000 + 0.1507i$	$0.0000 + 0.3194i$	$0.0000 + 0.0943i$	$0.0000 + 0.1440i$	$0.0000 + 0.3204i$
$0.0000 + 0.1432i$	$0.0000 + 0.0934i$	$0.0000 + 0.2943i$	$0.0000 + 0.1513i$	$0.0000 + 0.0977i$
$0.0175 + 0.6613i$	$0.0000 + 0.1432i$	$0.0000 + 0.1373i$	$0.0000 + 0.2943i$	$0.0000 + 0.1513i$
$0.0000 + 0.1432i$	$0.0175 + 0.6613i$	$0.0000 + 0.0911i$	$0.0000 + 0.1373i$	$0.0000 + 0.2943i$
$0.0000 + 0.1373i$	$0.0000 + 0.0911i$	$0.0175 + 0.6634i$	$0.0000 + 0.1453i$	$0.0000 + 0.0954i$
$0.0000 + 0.2943i$	$0.0000 + 0.1373i$	$0.0000 + 0.1453i$	$0.0175 + 0.6634i$	$0.0000 + 0.1453i$
$0.0000 + 0.1513i$	$0.0000 + 0.2943i$	$0.0000 + 0.0954i$	$0.0000 + 0.1453i$	$0.0175 + 0.6634i$
$0.0000 + 0.1440i$	$0.0000 + 0.0943i$	$0.0000 + 0.3215i$	$0.0000 + 0.1528i$	$0.0000 + 0.0988i$
$0.0000 + 0.3204i$	$0.0000 + 0.1440i$	$0.0000 + 0.1386i$	$0.0000 + 0.3215i$	$0.0000 + 0.1528i$
$0.0000 + 0.1440i$	$0.0000 + 0.3204i$	$0.0000 + 0.0922i$	$0.0000 + 0.1386i$	$0.0000 + 0.3215i$
$0.0000 + 0.1389i$	$0.0000 + 0.1010i$	$0.0000 + 0.1683i$	$0.0000 + 0.1489i$	$0.0000 + 0.1066i$
$0.0000 + 0.1430i$	$0.0000 + 0.1593i$	$0.0000 + 0.1033i$	$0.0000 + 0.1443i$	$0.0000 + 0.1708i$

Colunas 10 a 14:

$0.0000 + 0.2943i$	$0.0000 + 0.1373i$	$0.0000 + 0.0911i$	$0.0000 + 0.1593i$	$0.0000 + 0.1010i$
$0.0000 + 0.1513i$	$0.0000 + 0.2943i$	$0.0000 + 0.1373i$	$0.0000 + 0.1430i$	$0.0000 + 0.1389i$
$0.0000 + 0.0977i$	$0.0000 + 0.1513i$	$0.0000 + 0.2943i$	$0.0000 + 0.1040i$	$0.0000 + 0.1613i$
$0.0000 + 0.3204i$	$0.0000 + 0.1440i$	$0.0000 + 0.0943i$	$0.0000 + 0.1613i$	$0.0000 + 0.1040i$
$0.0000 + 0.1440i$	$0.0000 + 0.3204i$	$0.0000 + 0.1440i$	$0.0000 + 0.1389i$	$0.0000 + 0.1430i$
$0.0000 + 0.0943i$	$0.0000 + 0.1440i$	$0.0000 + 0.3204i$	$0.0000 + 0.1010i$	$0.0000 + 0.1593i$
$0.0000 + 0.3215i$	$0.0000 + 0.1386i$	$0.0000 + 0.0922i$	$0.0000 + 0.1683i$	$0.0000 + 0.1033i$
$0.0000 + 0.1528i$	$0.0000 + 0.3215i$	$0.0000 + 0.1386i$	$0.0000 + 0.1489i$	$0.0000 + 0.1443i$
$0.0000 + 0.0988i$	$0.0000 + 0.1528i$	$0.0000 + 0.3215i$	$0.0000 + 0.1066i$	$0.0000 + 0.1708i$
$0.0175 + 0.6634i$	$0.0000 + 0.1453i$	$0.0000 + 0.0954i$	$0.0000 + 0.1708i$	$0.0000 + 0.1066i$
$0.0000 + 0.1453i$	$0.0175 + 0.6634i$	$0.0000 + 0.1453i$	$0.0000 + 0.1443i$	$0.0000 + 0.1489i$
$0.0000 + 0.0954i$	$0.0000 + 0.1453i$	$0.0175 + 0.6634i$	$0.0000 + 0.1033i$	$0.0000 + 0.1683i$
$0.0000 + 0.1708i$	$0.0000 + 0.1443i$	$0.0000 + 0.1033i$	$4.1010 + 1.6570i$	$0.0000 + 0.1282i$
$0.0000 + 0.1066i$	$0.0000 + 0.1489i$	$0.0000 + 0.1683i$	$0.0000 + 0.1282i$	$4.1010 + 1.6570i$

A partir dos métodos, apresentados anteriormente, é possível reduzir esta matriz a um matriz de dimensões 3X3 :

2 Matriz impedância série 3X3

$$\begin{bmatrix} 0.0196 + 0.6604i & 0.0029 + 0.1420i & 0.0035 + 0.0909i \\ 0.0029 + 0.1420i & 0.0216 + 0.6596i & 0.0048 + 0.1383i \\ 0.0035 + 0.0909i & 0.0048 + 0.1383i & 0.0144 + 0.4760i \end{bmatrix}$$

3 Impedância por fase

A partir da matriz de impedância série (3X3) pode-se calcular a impedância por fase. Sabe-se que a impedância mútua são os elementos fora da diagonal principal, e a impedância própria os elementos da diagonal principal da matriz. A partir da seguinte equação:

4 Sequência Positiva e Negativa

$$Z_{fase} = Z_{propria} - Z_{mutua} \quad (19)$$

Em que foi encontrado o seguinte valor: $0.0148 + 0.4749i$

5 Sequência Zero

$$Z_{fase} = Z_{propria} + 2 * Z_{mutua} \quad (20)$$

Em que foi encontrado o seguinte valor: $0.0260 + 0.8461i$

b Matriz admitância "shunt" 14X14

Para o cálculo da matriz admitância "shunt" 14 X14 foi considerado o solo plano e homogêneo, a linha como sendo constituída de condutores paralelos entre si e ao solo, e foi desprezado o efeito das torres no campo magnético e o efeito coroa.

Colunas 1 a 4:

0.0000 + 0.3873i	0.0000 - 0.0084i	0.0000 - 0.0027i	0.0000 - 0.1017i
0.0000 - 0.0084i	0.0000 + 0.3906i	0.0000 - 0.0081i	0.0000 - 0.0112i
0.0000 - 0.0027i	0.0000 - 0.0081i	0.0000 + 0.3891i	0.0000 - 0.0031i
0.0000 - 0.1017i	0.0000 - 0.0112i	0.0000 - 0.0031i	0.0000 + 0.3891i
0.0000 - 0.0063i	0.0000 - 0.0994i	0.0000 - 0.0112i	0.0000 - 0.0081i
0.0000 - 0.0024i	0.0000 - 0.0063i	0.0000 - 0.1017i	0.0000 - 0.0027i
0.0000 - 0.1023i	0.0000 - 0.0079i	0.0000 - 0.0026i	0.0000 - 0.0621i
0.0000 - 0.0079i	0.0000 - 0.0991i	0.0000 - 0.0075i	0.0000 - 0.0105i
0.0000 - 0.0026i	0.0000 - 0.0075i	0.0000 - 0.1004i	0.0000 - 0.0029i
0.0000 - 0.0621i	0.0000 - 0.0105i	0.0000 - 0.0029i	0.0000 - 0.1004i
0.0000 - 0.0059i	0.0000 - 0.0599i	0.0000 - 0.0105i	0.0000 - 0.0075i
0.0000 - 0.0023i	0.0000 - 0.0059i	0.0000 - 0.0621i	0.0000 - 0.0026i
0.0000 - 0.0157i	0.0000 - 0.0111i	0.0000 - 0.0052i	0.0000 - 0.0158i
0.0000 - 0.0048i	0.0000 - 0.0092i	0.0000 - 0.0158i	0.0000 - 0.0052i

Colunas 5 a 9:

0.0000 - 0.0063i	0.0000 - 0.0024i	0.0000 - 0.1023i	0.0000 - 0.0079i	0.0000 - 0.0026i
0.0000 - 0.0994i	0.0000 - 0.0063i	0.0000 - 0.0079i	0.0000 - 0.0991i	0.0000 - 0.0075i
0.0000 - 0.0112i	0.0000 - 0.1017i	0.0000 - 0.0026i	0.0000 - 0.0075i	0.0000 - 0.1004i
0.0000 - 0.0081i	0.0000 - 0.0027i	0.0000 - 0.0621i	0.0000 - 0.0105i	0.0000 - 0.0029i
0.0000 + 0.3906i	0.0000 - 0.0084i	0.0000 - 0.0059i	0.0000 - 0.0599i	0.0000 - 0.0105i
0.0000 - 0.0084i	0.0000 + 0.3873i	0.0000 - 0.0023i	0.0000 - 0.0059i	0.0000 - 0.0621i
0.0000 - 0.0059i	0.0000 - 0.0023i	0.0000 + 0.3878i	0.0000 - 0.0081i	0.0000 - 0.0026i
0.0000 - 0.0599i	0.0000 - 0.0059i	0.0000 - 0.0081i	0.0000 + 0.3909i	0.0000 - 0.0077i
0.0000 - 0.0105i	0.0000 - 0.0621i	0.0000 - 0.0026i	0.0000 - 0.0077i	0.0000 + 0.3898i
0.0000 - 0.0075i	0.0000 - 0.0026i	0.0000 - 0.1011i	0.0000 - 0.0108i	0.0000 - 0.0030i
0.0000 - 0.0991i	0.0000 - 0.0079i	0.0000 - 0.0061i	0.0000 - 0.0991i	0.0000 - 0.0108i
0.0000 - 0.0079i	0.0000 - 0.1023i	0.0000 - 0.0023i	0.0000 - 0.0061i	0.0000 - 0.1011i
0.0000 - 0.0092i	0.0000 - 0.0048i	0.0000 - 0.0213i	0.0000 - 0.0145i	0.0000 - 0.0060i
0.0000 - 0.0111i	0.0000 - 0.0157i	0.0000 - 0.0056i	0.0000 - 0.0121i	0.0000 - 0.0218i

Colunas 10 a 14:

0.0000 - 0.0621i	0.0000 - 0.0059i	0.0000 - 0.0023i	0.0000 - 0.0157i	0.0000 - 0.0048i
0.0000 - 0.0105i	0.0000 - 0.0599i	0.0000 - 0.0059i	0.0000 - 0.0111i	0.0000 - 0.0092i
0.0000 - 0.0029i	0.0000 - 0.0105i	0.0000 - 0.0621i	0.0000 - 0.0052i	0.0000 - 0.0158i
0.0000 - 0.1004i	0.0000 - 0.0075i	0.0000 - 0.0026i	0.0000 - 0.0158i	0.0000 - 0.0052i
0.0000 - 0.0075i	0.0000 - 0.0991i	0.0000 - 0.0079i	0.0000 - 0.0092i	0.0000 - 0.0111i
0.0000 - 0.0026i	0.0000 - 0.0079i	0.0000 - 0.1023i	0.0000 - 0.0048i	0.0000 - 0.0157i
0.0000 - 0.1011i	0.0000 - 0.0061i	0.0000 - 0.0023i	0.0000 - 0.0213i	0.0000 - 0.0056i
0.0000 - 0.0108i	0.0000 - 0.0991i	0.0000 - 0.0061i	0.0000 - 0.0145i	0.0000 - 0.0121i
0.0000 - 0.0030i	0.0000 - 0.0108i	0.0000 - 0.1011i	0.0000 - 0.0060i	0.0000 - 0.0218i
0.0000 + 0.3898i	0.0000 - 0.0077i	0.0000 - 0.0026i	0.0000 - 0.0218i	0.0000 - 0.0060i
0.0000 - 0.0077i	0.0000 + 0.3909i	0.0000 - 0.0081i	0.0000 - 0.0121i	0.0000 - 0.0145i
0.0000 - 0.0026i	0.0000 - 0.0081i	0.0000 + 0.3878i	0.0000 - 0.0056i	0.0000 - 0.0213i
0.0000 - 0.0218i	0.0000 - 0.0121i	0.0000 - 0.0056i	0.0000 + 0.2432i	0.0000 - 0.0175i
0.0000 - 0.0060i	0.0000 - 0.0145i	0.0000 - 0.0213i	0.0000 - 0.0175i	0.0000 + 0.2432i

A partir dos métodos, apresentados anteriormente, é possível reduzir esta matriz a um matriz de dimensões 3X3 :

1 Matriz admitância "shunt" 3X3

1.0e - 05*

$$\begin{bmatrix} 0.0000 + 0.2635i & 0.0000 - 0.0476i & 0.0000 - 0.0305i \\ 0.0000 - 0.0476i & 0.0000 + 0.2763i & 0.0000 - 0.0622i \\ 0.0000 - 0.0305i & 0.0000 - 0.0622i & 0.0000 + 0.3854i \end{bmatrix}$$

2 Admitância por fase

A partir da matriz de Admitância "shunt" (3X3) pode-se calcular a admitância por fase. Sabe-se que a admitância mútua são os elementos fora da diagonal principal, e a admitância própria os elementos da diagonal principal da matriz. A partir da seguinte equação:

3 Sequencia positiva e negativa

$$Y_{fase} = Y_{propria} + Y_{mutua} \quad (21)$$

Em que foi encontrado o seguinte valor: $2.6162e - 06i$

4 Sequencia zero

$$Y_{fase} = Y_{propria} - 2 * Y_{mutua} \quad (22)$$

Em que foi encontrado o seguinte valor: $4.0193e - 06i$

6 Aplicações

Uma das aplicações do cálculo de parâmetros elétricos de uma linha de transmissão aérea é o cálculo de curto-circuito. Abaixo, será mostrado como ele é calculado.

O circuito em que será realizado o estudo:

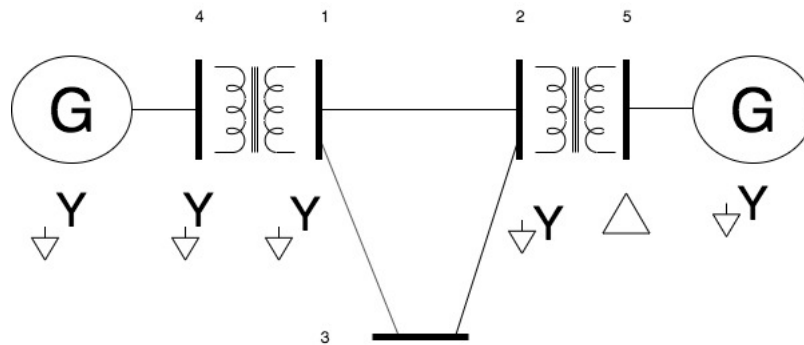


Figure 6: Circuito para cálculo de curto-circuito

Com os seguintes dados:

	Potência(MVA)	Tensão(KV)	X1[pu]	X2[pu]	X0[pu]
Gerador 1	100	25	0,20	0,20	0,05
Gerador 2	100	13,8	0,20	0,20	0,05
Transformador 1	100	25/230	0,05	0,05	0,05
Transformador 2	100	13,8/230	0,05	0,05	0,05
Linha de Transmissão 1-2	100	230	0,1	0,1	0,3
Linha de Transmissão 1-3	100	230	0,1	0,1	0,3
Linha de Transmissão 2-3	100	230	0,1	0,01	0,3

Table 5: Dados do Circuito

O cálculo dos equivalentes de Thévenin, visto pela barra 3, foi realizado no matlab - está presente no Appendix - gerando os seguintes valores :

Sequência positiva : $Z_{Thvenin} = 0.1750j[pu]$

Sequência negativa : é o mesmo da positiva, pois as reatâncias não se alteram : $Z_{Thvenin} = 0.1750j[pu]$

Sequência zero: $Z_{Thvenin} = 0.1989j[pu]$

Para um curto trifásico, usaremos o $Z_{thevenin}$ da sequência positiva.

$$I_{falta} = \frac{V_{thevenin}}{Z_{thevenin}}$$

No domínio da sequência :

$$I_{falta2} = I_{falta0} = 0$$

$$I_{falta1} = \frac{V_{thevenin}}{Z_{thevenin}} = \frac{1}{0.1750j} = -5.7143j$$

Nodomnioda fase :

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

Substituindo os valores de I_0, I_1, I_2 encontra-se os seguintes valores:

$$I_a = -5.7143j[pu]$$

$$I_b = -4.95 + 2.86j[pu]$$

$$I_c = 4.95 + 2.86j[pu]$$

Para um curto monofásico :

$$I_{falta} = I_0 = I_1 = I_2 = \frac{V_{thevenin}}{Z_{th0} + Z_{th1} + Z_{th2} + 3*Z_f} = \frac{1}{0.1989j + 0.1750j + 0.1750j} = -1.8218j$$

No dominio de fase:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} -1.8218j \\ -1.8218j \\ -1.8218j \end{bmatrix}$$

$$I_a = -5.465j[pu]$$

$$I_b = 0$$

$$I_c = 0$$

$$V_0 = -Z_{th0} * I_f = -0.1989j * -1.8218j = -0.3624[pu];$$

$$V_1 = V_{th} - Z_{th1} * I_f = 1 - (0.1750j * -1.8218j) = 0.6812[pu];$$

$$V_2 = -Z_{th2} * I_f = -0.1750j * -1.8218j = -0.3188[pu];$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} -0.3624 \\ 0.6812 \\ 0.3188 \end{bmatrix}$$

$$V_a = 0$$

$$V_b = -0.542 - 0.867j[pu]$$

$$V_c = -0.542 + 0.867j[pu]$$

Para um curto fase-fase:

$$I_{falta1} = -I_{falta2} = \frac{V_{thevenin}}{Z_{th1} + Z_{th2}} = \frac{1}{0.1750j + 0.1750j} = -2.857j$$

$$I_{falta0} = 0$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} -0 \\ -2.857j \\ 2.857j \end{bmatrix}$$

$$I_a = 0$$

$$I_b = -4.9487[pu]$$

$$I_c = 4.9487[pu]$$

$$V_0 = 0;$$

$$V_1 = V_{th} - Z_{th1} * I_f = 1 - (0.1750j * -2.857j) = 0.5[pu];$$

$$V_2 = -Z_{th2} * I_f = -0.1750j * 2.857j = 0.5[pu];$$

No domínio da fase:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} V_a &= 1[pu] \\ V_b &= -0.5[pu] \\ V_c &= -0.5[pu] \end{aligned}$$

Assim, foi apresentado uma ,entre muitas aplicações ,de cálculos de parâmetros elétricos de linhas de transmissão aéreas. Outra aplicação muito comum, seria para o cálculo de fluxo de potência, um modelo matemático complexo, que permite determinar os valores de tensão e potência em cada um dos pontos do sistema.

7 Conclusão

Assim, foi apresentado como calcular os parâmetros uma linha de transmissão aérea. Primeiro, foi apresentado os métodos matemáticos necessários, posteriormente, como escrever um programa que realize as operações matemáticas, se sua execução.

Portanto, foi possível observar a eficácia do modelo e suas aplicações. Para a obtenção de resultados mais precisos seria necessário a utilização de outros fatores que não foram considerados, a resistividade do solo diferente de zero, o cálculo das flechas das linhas de transmissão, dentre outros.

Mesmo assim, os resultados obtidos foram bem próximos aos reais, satisfazendo os objetivos deste estudo.

Referências

- [1] A. Chakrabarti and S. Halder, *Power System Analysis: Operation And Control 3Rd Ed.* PHI Learning, 2010.
[Online]. Available: https://books.google.com.br/books?id=6Djxs3XQ_MEC
 - [2] I. M. Cleber Roberto Guirelli, *Transmissão de energia elétrica - Teoria e prática em linhas aéreas.* Editora Mackenzie, 2014.
 - [3] G. STEVENSON, Willian D., *Power System Analysis.* McGraw-Hill, Inc, 1994.
 - [4] "MATLAB Answers," <https://www.mathworks.com/matlabcentral/answers/>.
 - [5] "Enel Power," <https://www.enelgreenpower.com/country-brazil>.
 - [6] JARDIM, Jorge, *Análise de Sistemas de Energia Elétrica I*, 2016.
- [1] [2] [3] [4] [5] [6]

A Appendix

a Código do caso exemplo

```
clear
clc

%Montar matriz imped ncia:

x(1)=-12.05;
x(2)=-0.55;
x(3)=10.95;
x(4)=-10.95;
x(5)=0.55;
x(6)=12.05;
x(7)=-12.05;
x(8)=-0.55;
x(9)=10.95;
x(10)=-10.95;
x(11)=0.55;
x(12)=12.05;
x(13)=-8.9;
x(14)=8.9;

y(1)=38;
y(2)=38;
y(3)=38;
y(4)=38;
y(5)=38;
y(6)=38;
y(7)=39.1;
y(8)=39.1;
y(9)=39.1;
y(10)=39.1;
y(11)=39.1;
y(12)=39.1;
y(13)=47.9;
y(14)=47.9;

for i=1:14
    for k=1:14
        D(i,k)=sqrt(((x(i) - x(k)).^2)+ ((y(i) - y(k))^2));
        DI(i,k)=sqrt(((x(i) - x(k)).^2)+ ((y(i) + y(k))^2));
    end
end

GMRc=0.01069; % raio medio geometrico dos condutores
GMRpr=0.0049469 ; % raio medio geometrico dos para-raios
Rc=0.1057;% resistencia dos condutores
Rpr=2.4860; %resistencia dos para-raio
n=14;

for i=1:n-2
    for k=1:n-2
        if (i==k)
            Z(i,k)=Rc+ 1i*120*pi*2*10^(-4)*log(DI(i,k)/GMRc);
        else
            Z(i,k)=1i*120*pi*2*10^(-4)*log(DI(i,k)/D(i,k));
        end
    end
end
```

```

for i=n-1:n
    for k=1:n
        if (i==k)
            Z(i,k)=Rpr+ 1i*120*pi*2*10^(-4)*log(DI(i,k)/GMRpr);
        else
            Z(i,k)=1i*120*pi*2*10^(-4)*log(DI(i,k)/D(i,k));
        end
    end
end

for i=1:n-2
    for k=n-1:n
        if (i==k)
            Z(i,k)=Rpr+ 1i*120*pi*2*10^(-4)*log(DI(i,k)/GMRpr);
        else
            Z(i,k)=1i*120*pi*2*10^(-4)*log(DI(i,k)/D(i,k));
        end
    end
end

%Reduzir a ordem da matriz:

%Tirar o ground da matriz: 2 grounds
%Redu o de Kron
m=12;
for p=m+1:m+2
    for i=1:m
        for j=1:m
            Z12(i,j)=Z(i,j)-(Z(i,p)*Z(p,j)/Z(p,p));
        end
    end
end

%Elimina o de condutores Bundle:

%Para Linha:

for j=1:12
    for i=1:3
        ZL(i,j)=Z12(i,j);
    end
    for i=4:3:12
        ZL(i,j)=Z12(i,j) - Z12(1,j);
    end
    for i=5:3:12
        ZL(i,j)=Z12(i,j) - Z12(2,j);
    end
    for i=6:3:12
        ZL(i,j)=Z12(i,j) - Z12(3,j);
    end
end

%Para coluna:

```

```

for i=1:12
    for j=1:3
        ZR(i,j)=ZL(i,j);
    end
    for j=4:3:12
        ZR(i,j)=ZL(i,j) - ZL(i,1);
    end
    for j=5:3:12
        ZR(i,j)=ZL(i,j) - ZL(i,2);
    end
    for j=6:3:12
        ZR(i,j)=ZL(i,j) - ZL(i,3);
    end
end

% Matriz 3X3:

for f=3:12
    for i=1:3
        for j=1:3
            Z3(i,j) = ZR(i,j) - ((ZR(i,f)*ZR(f,j)) / ZR(f,f));
        end
    end
end

%Impedancia propria e Mutua:

Zpropria=(Z3(1,1) + Z3(2,2) + Z3(3,3))/3;
Zmutua=(Z3(1,2) + Z3(1,3) + Z3(2,3))/3;

%Impedancia por fase:

Zfase1=Zpropria - Zmutua;
Zfase0 = Zpropria + 2*Zmutua;

%Montar a matriz P:

rc=0.02959/2; % raio do condutor
rpr=0.00952/2; % raio do para-raio
m=14;

for i=1:m-2
    for j= 1:m-2
        if (i==j)
            P(i,j) = (1/(2*pi*8.852*10^(-9)))*log(DI(i,j)/rc);
        else
            P(i,j) = (1/(2*pi*8.852*10^(-9)))*log(DI(i,j)/D(i,j));
        end
    end
end

```



```

end

for i=m-1:m
    for j=1:m
        if(i==j)
            P(i,j) = (1/(2*pi*8.852*10^(-9)))*log(DI(i,j)/rpr);
        else
            P(i,j) = (1/(2*pi*8.852*10^(-9)))*log(DI(i,j)/D(i,j));
        end
    end
end

for i=1:m-2
    for j=m-1:m
        if(i==j)
            P(i,j) = (1/(2*pi*8.852*10^(-9)))*log(DI(i,j)/rpr);
        else
            P(i,j) = (1/(2*pi*8.852*10^(-9)))*log(DI(i,j)/D(i,j));
        end
    end
end

%Montar a matriz Y:

aux=inv(P);

Y = 1i*120*pi*aux;

%Montar P 3X3:

%Tirar o ground da matriz: 2 grounds
%Redu o de Kron

m=12;
for p=m+1:m+2
    for i=1:m
        for j=1:m
            P12(i,j)=P(i,j)-(P(i,p)*P(p,j)/P(p,p));
        end
    end
end

%Elimina o de condutores Bundle:

%Para Linha:

for j=1:12
    for i=1:3
        PL(i,j)=P12(i,j);
    end
    for i=4:3:12
        PL(i,j)=P12(i,j) - P12(1,j);
    end
    for i=5:3:12
        PL(i,j)=P12(i,j) - P12(2,j);
    end
end

```

```

        end
        for i=6:3:12
            PL(i,j)=P12(i,j) - P12(3,j);
        end

    end

%Para coluna:

for i=1:12
    for j=1:3
        PR(i,j)=PL(i,j);
    end
    for j=4:3:12
        PR(i,j)=PL(i,j) - PL(i,1);

    end
    for j=5:3:12
        PR(i,j)=PL(i,j) - PL(i,2);

    end
    for j=6:3:12
        PR(i,j)=PL(i,j) - PL(i,3);
    end

end

% Matriz P 3X3:

for f=3:12
    for i=1:3
        for j=1:3
            P3(i,j) = PR(i,j) - ((PR(i,f)*PR(f,j)) / PR(f,f));
        end
    end
end

% Matrix Y 3X3:

aux3=inv(P3);
Y3 = 1i * 120 * pi * aux3;

%Admitancia propria e Mutua:

Ypropria=(Y3(1,1) + Y3(2,2) + Y3(3,3))/3;
Ymutua=(Y3(1,2) + Y3(1,3) + Y3(2,3))/3;

%Admitancia por fase:
Yfase1=Ypropria + Ymutua;
Yfase0 = Ypropria - 2*Ymutua;

```

b Código Matlab - Interligação Sudestes Nordeste

```
clear
clc

%Montar matriz imped ncia:

x(1)=-12.05;
x(2)=-0.55;
x(3)=10.95;
x(4)=-10.95;
x(5)=0.55;
x(6)=12.05;
x(7)=-12.05;
x(8)=-0.55;
x(9)=10.95;
x(10)=-10.95;
x(11)=0.55;
x(12)=12.05;
x(13)=-8.9;
x(14)=8.9;

y(1)=38;
y(2)=38;
y(3)=38;
y(4)=38;
y(5)=38;
y(6)=38;
y(7)=39.1;
y(8)=39.1;
y(9)=39.1;
y(10)=39.1;
y(11)=39.1;
y(12)=39.1;
y(13)=47.9;
y(14)=47.9;

for i=1:14
    for k=1:14
        D(i,k)=sqrt(((x(i) - x(k)).^2)+ ((y(i) - y(k))^2));
        DI(i,k)=sqrt(((x(i) - x(k)).^2)+ ((y(i) + y(k))^2));
    end
end

GMRc=0.0118; % raio medio geometrico dos condutores
GMRpr=27357.2*10^(-12); % raio medio geometrico dos para-raios
Rc=0.0175;% resistencia dos condutores
Rpr=4.101; %resistencia dos para-raio
n=14;

for i=1:n-2
    for k=1:n-2
        if (i==k)
            Z(i,k)=Rc+ 1i*120*pi*2*10^(-4)*log(DI(i,k)/GMRc);
        else
            Z(i,k)=1i*120*pi*2*10^(-4)*log(DI(i,k)/D(i,k));
        end
    end
end

for i=n-1:n
```

```
for k=1:n
    if (i==k)
        Z(i,k)=Rpr+ 1i*120*pi*2*10^(-4)*log(DI(i,k)/GMRpr);
    else
        Z(i,k)=1i*120*pi*2*10^(-4)*log(DI(i,k)/D(i,k));
    end
end
end
```

```
for i=1:n-2
    for k=n-1:n
        if (i==k)
            Z(i,k)=Rpr+ 1i*120*pi*2*10^(-4)*log(DI(i,k)/GMRpr);
        else
            Z(i,k)=1i*120*pi*2*10^(-4)*log(DI(i,k)/D(i,k));
        end
    end
end
```

%Reduzir a ordem da matriz:

```
%Tirar o ground da matriz: 2 grounds
%Redu o de Kron
m=12;
for p=m+1:m+2
    for i=1:m
        for j=1:m
            Z12(i,j)=Z(i,j)-(Z(i,p)*Z(p,j)/Z(p,p));
        end
    end
end
```

%Elimina o de condutores Bundle:

%Para Linha:

```
for j=1:12
    for i=1:3
        ZL(i,j)=Z12(i,j);
    end
    for i=4:3:12
        ZL(i,j)=Z12(i,j) - Z12(1,j);
    end
    for i=5:3:12
        ZL(i,j)=Z12(i,j) - Z12(2,j);
    end
    for i=6:3:12
        ZL(i,j)=Z12(i,j) - Z12(3,j);
    end
end
```

%Para coluna:

```
for i=1:12
    for j=1:3
        ZR(i,j)=ZL(i,j);
    end
    for j=4:3:12
        ZR(i,j)=ZL(i,j) - ZL(i,1);
    end
end
```

```

end
for j=5:3:12
  ZR(i,j)=ZL(i,j) - ZL(i,2);
end
for j=6:3:12
  ZR(i,j)=ZL(i,j) - ZL(i,3);
end
end

% Matriz 3X3:

for f=3:12
  for i=1:3
    for j=1:3
      Z3(i,j) = ZR(i,j) - ((ZR(i,f)*ZR(f,j)) / ZR(f,f));
    end
  end
end

%Impedancia propria e Mutua:

Zpropria=(Z3(1,1) + Z3(2,2) + Z3(3,3))/3;
Zmutua=(Z3(1,2) + Z3(1,3) + Z3(2,3))/3;

%Impedancia por fase:

Zfase1=Zpropria - Zmutua;
Zfase0 = Zpropria + 2*Zmutua;

%Montar a matriz P:

rc=0.02959/2; % raio do condutor
rpr=0.00952/2; % raio do para-raio
m=14;

for i=1:m-2
  for j= 1:m-2
    if(i==j)
      P(i,j) = (1/(2*pi*8.852*10^(-9)))*log(Dl(i,j)/rc);
    else
      P(i,j) = (1/(2*pi*8.852*10^(-9)))*log(Dl(i,j)/D(i,j));
    end
  end
end

for i=m-1:m
  for j=1:m
    if(i==j)
      P(i,j) = (1/(2*pi*8.852*10^(-9)))*log(Dl(i,j)/rpr);
    else
      P(i,j) = (1/(2*pi*8.852*10^(-9)))*log(Dl(i,j)/D(i,j));
    end
  end
end
end

```

```

for i=1:m-2
for j=m-1:m
if (i==j)
P(i,j) = (1/(2*pi*8.852*10^(-9)))*log(Dl(i,j)/rpr);
else
P(i,j) = (1/(2*pi*8.852*10^(-9)))*log(Dl(i,j)/D(i,j));
end
end
end

```

%Montar a matriz Y:

```
aux=inv(P);
```

```
Y = 1i*120*pi*aux;
```

%Montar P 3X3:

%Tirar o ground da matriz: 2 grounds
%Redu o de Kron

```

m=12;
for p=m+1:m+2
for i=1:m
for j=1:m
P12(i,j)=P(i,j)-(P(i,p)*P(p,j)/P(p,p));
end
end
end

```

%Elimina o de condutores Bundle:

%Para Linha:

```

for j=1:12
for i=1:3
PL(i,j)=P12(i,j);
end
for i=4:3:12
PL(i,j)=P12(i,j) - P12(1,j);
end
for i=5:3:12
PL(i,j)=P12(i,j) - P12(2,j);
end
for i=6:3:12
PL(i,j)=P12(i,j) - P12(3,j);
end
end

```

%Para coluna:

```

for i=1:12
for j=1:3
PR(i,j)=PL(i,j);
end
for j=4:3:12
PR(i,j)=PL(i,j) - PL(i,1);
end

```

```

for j=5:3:12
PR(i,j)=PL(i,j) - PL(i,2);
end
for j=6:3:12
PR(i,j)=PL(i,j) - PL(i,3);
end
end

% Matriz P 3X3:

for f=3:12
for i=1:3
for j=1:3
P3(i,j) = PR(i,j) - ((PR(i,f)*PR(f,j)) / PR(f,f));
end
end
end

% Matrix Y 3X3:

aux3=inv(P3);
Y3 = 1i * 120 * pi * aux3;

%Admitancia propria e Mutua:

Ypropria=(Y3(1,1) + Y3(2,2) + Y3(3,3))/3;
Ymutua=(Y3(1,2) + Y3(1,3) + Y3(2,3))/3;

%Admitancia por fase:

Yfase1=Ypropria + Ymutua;
Yfase0 = Ypropria - 2*Ymutua;

```

c Código de Matlab sobre aplicações

```
clear all
clear
clc

Gerador1 = [0.2;0.2;0.05];
Gerador2 = Gerador1;

T1 = [0.05;0.05;0.05];
T2 = [0.05;0.05;0.05];
L12 = [0.1;0.1;0.3];
L13 = [0.1;0.1;0.3];
L32 = [0.1;0.1;0.3];

%Positiva
Z1= (L12(1)/3)+T1(1)+Gerador1(1);
Z2= (L13(1)/3)+T2(1)+Gerador2(1);

ZP1 = inv(1/(Z1) + 1/(Z2));

Z_thevenin_posi = ZP1 + (L32(1)/3);

% Negativa

Z_thevenin_neg= Z_thevenin_posi;

%Zero

Z1_zero= (L12(3)/3)+T1(3)+Gerador1(3)+3*0.03;
Z2_zero = (L13(3)/3)+T2(3);

ZP2= inv(1/(Z1_zero)+1/(Z2_zero));

Z_thevenin_zero = ZP2 + (L32(3)/3);
```