Elemento *Line* do OpenDSS

1 Objetivo

O objetivo desse documento é descrever os principais parâmetros que o OpenDSS utiliza para definir as diferentes configurações de linhas aéreas através do elemento *Line*. Além disso, são destacadas as vantagens de se definir linhas com o auxílio do elemento genérico *LineCode* ou do par de elementos genéricos *WireData* e *LineGeometry*. Os principais parâmetros para algumas configurações de linha são apresentados através de sua modelagem matemática.

Por fim, exemplos de códigos na linguagem de programação do OpenDSS são apresentados.

2 Por quê?

As linhas são elementos essenciais para definição de sistemas elétricos no OpenDSS. Elas podem apresentar diferentes configurações como, por exemplo:

- Linha Trifásica à 4 fios
- Linha Trifásica à 3 fios
- Linha Bifásica à 3 fios
- Linha Bifásica à 2 fios
- Linha Monofásica à 2 fios
- Linha Monofásica à 1 fio

Por esse motivo, é de grande importância que o usuário saiba como modelar e definir a configuração que se deseja. Para isso, alguns conceitos são introduzidos de forma simplificada, como:

- Utilização de componentes simétricas em definições de linhas
- Correção de Carson
- Redução de Kron

3 Modelagem

A modelagem matemática das principais configurações de linhas aéreas é apresentada com o objetivo de compreender os parâmetros utilizados no OpenDSS. As linhas são representadas através do modelo

π, como apresentado na Figura 1, onde $\bar{\mathbf{Z}}$ e $\mathbf{C}$ são as matrizes de impedância série e de capacitância nodal, respectivamente.

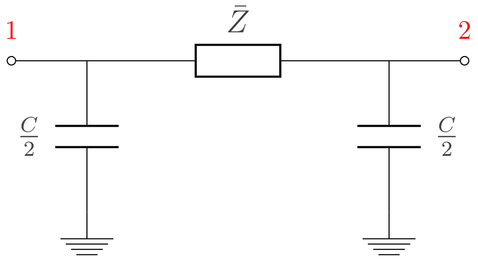

Figura 1: Linha Representada pelo Modelo π

A lista a seguir apresenta as configurações modeladas nessa nota técnica:

- Linha Trifásica à 4 fios
- Linha Trifásica à 3 fios
- Linha Monofásica à 2 fios

Para a linha trifásica à 4 fios são calculadas as matrizes $\mathbf{R}$, $\mathbf{X}$ e $\mathbf{C}$ considerando os dados dos condutores e sua configuração geométrica. Para as outras configurações, considera-se que essas matrizes são conhecidas, isto é, já foram previamente calculadas pela mesma metodologia.

3.1 Linha Trifásica à 4 Fios

A Figura 2 apresenta a geometria do poste que sustenta uma linha trifásica à 4 fios, constituída de 3 condutores de fase, A, B e C, e um condutor de neutro, N. A sua representação através do modelo π é exibida na Figura 3. Nesse modelo, é possível observar 4 impedâncias próprias, 6 impedâncias mútuas, 8 capacitâncias próprias e 12 capacitâncias mútuas.

A matrizes de impedância série e de capacitância nodal são calculadas separadamente, conforme apresentado nas seções 3.1.1 e 3.1.2.

3.1.1 Cálculo da Matriz de Impedância Série

O cálculo da matriz de impedância série é realizado desconsiderando a presença das capacitâncias próprias e mútuas, como se pode observar na Figura 4.

Observando a mesma figura, é possível escrever a equação da segunda lei de Kirchhoff para cada malha que envolve um dos condutores e a referência, obtendo, portanto, a expressão 1, na forma matricial.

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{V}_A \\ \Delta\dot{V}_B \\ \Delta\dot{V}_C \\ \Delta\dot{V}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{V}_A \\ \dot{V}_B \\ \dot{V}_C \\ \dot{V}_N \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \\ \dot{V}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{AA} & \bar{Z}_{AB} & \bar{Z}_{AC} & \bar{Z}_{AN} \\ \bar{Z}_{AB} & \bar{Z}_{BB} & \bar{Z}_{BC} & \bar{Z}_{BN} \\ \bar{Z}_{AC} & \bar{Z}_{BC} & \bar{Z}_{CC} & \bar{Z}_{CN} \\ \bar{Z}_{AN} & \bar{Z}_{BN} & \bar{Z}_{CN} & \bar{Z}_{NN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \\ \dot{I}_N \end{bmatrix} \tag{1}$$

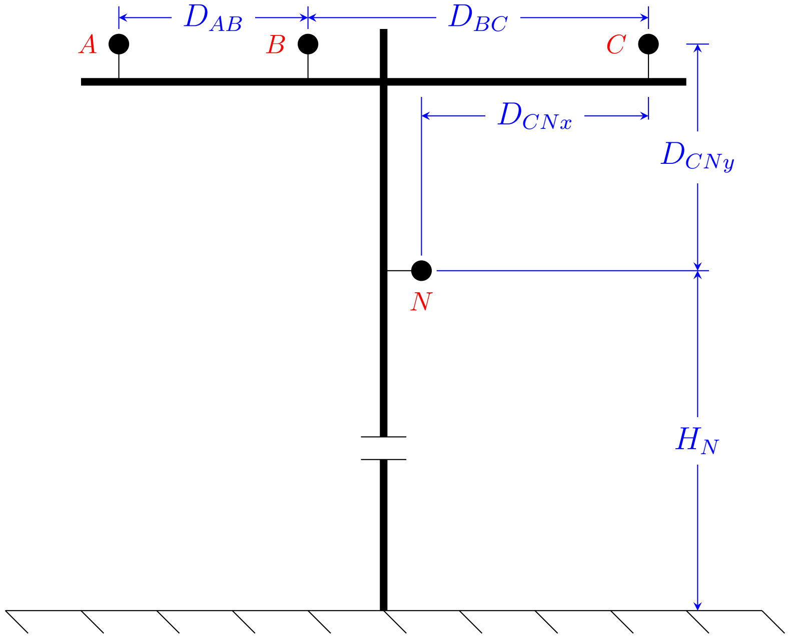

Figura 2: Configuração Geométrica de uma Linha Trifásica à 4 Fios

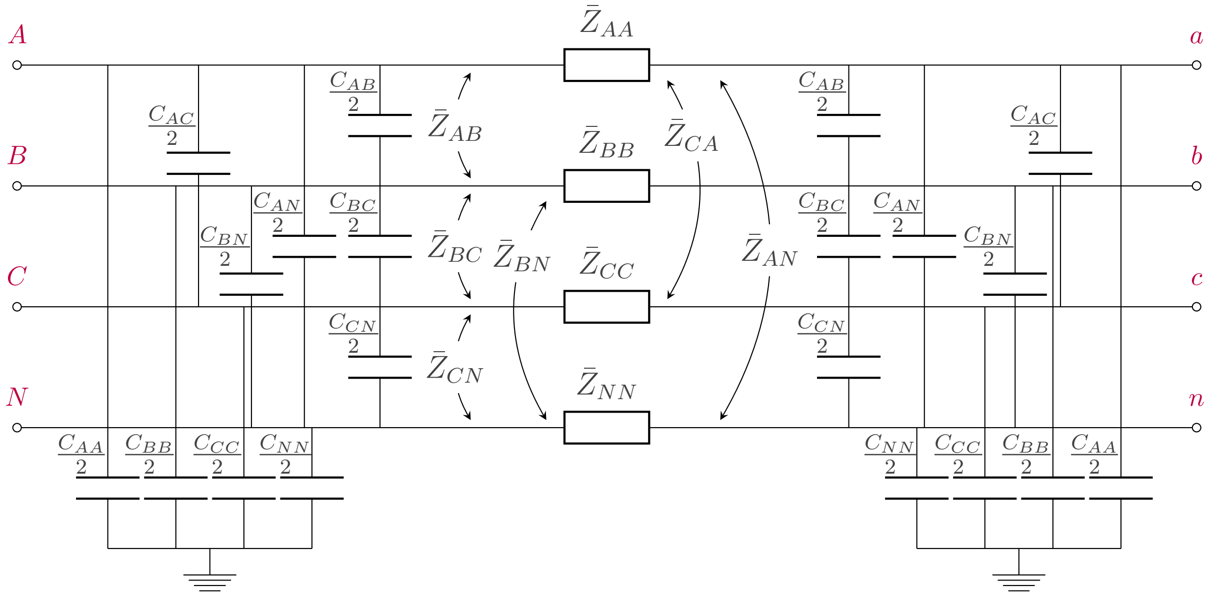

Figura 3: Modelo π de uma Linha Trifásica à 4 Fios

A matriz de impedância série, segundo a Equação 2, pode ser decomposta em uma matriz de resistência série e uma matriz de reatância série, para uma frequência f, específica. Essas matrizes são simétricas, pois a linha está disposta no ar, um meio linear, com permeabilidade magnética constante. Portanto, pode-se escrever que $\bar{Z}_{IJ} = \bar{Z}_{JI}$.

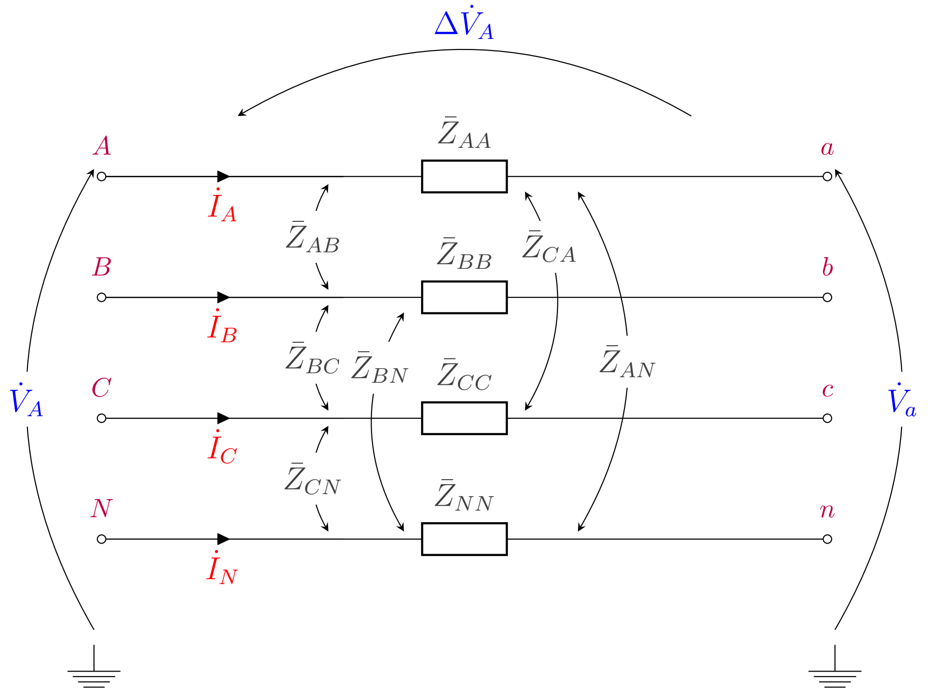

Figura 4: Impedâncias Série da Linha

$$\bar{\mathbf{Z}} = \mathbf{R} + j \times \mathbf{X} \tag{2}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{Z}_{AA} & \bar{Z}_{AB} & \bar{Z}_{AC} & \bar{Z}_{AN} \\ \bar{Z}_{AB} & \bar{Z}_{BB} & \bar{Z}_{BC} & \bar{Z}_{BN} \\ \bar{Z}_{AC} & \bar{Z}_{BC} & \bar{Z}_{CC} & \bar{Z}_{CN} \\ \bar{Z}_{AN} & \bar{Z}_{BN} & \bar{Z}_{CN} & \bar{Z}_{NN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{AA} & R_{AB} & R_{AC} & R_{AN} \\ R_{AB} & R_{BB} & R_{BC} & R_{BN} \\ R_{AC} & R_{BC} & R_{CC} & R_{CN} \\ R_{AN} & R_{BN} & R_{CN} & R_{NN} \end{bmatrix} + j \times \begin{bmatrix} X_{AA} & X_{AB} & X_{AC} & X_{AN} \\ X_{AB} & X_{BB} & X_{BC} & X_{BN} \\ X_{AC} & X_{BC} & X_{CC} & X_{CN} \\ X_{AN} & X_{BN} & X_{CN} & X_{NN} \end{bmatrix} \tag{3}$$

Em (4) e (5) é apresentado como as impedâncias próprias e as impedâncias mútuas da expressão 3 são definidas considerando a correção de Carson modificada, isto é, quando apenas parte da formulação completa é utilizada, conforme apresentado em [1].

$$\bar{Z}_{II} = \bar{Z}_{ii} + \bar{Z}_g \tag{4}$$

$$\bar{Z}_{IJ} = \bar{Z}_{ij} + \bar{Z}_g, \quad I \neq J \tag{5}$$

As impedâncias próprias, $\bar{Z}_{ii}$, e mútuas, $\bar{Z}_{ij}$, não consideram a influência do solo e são calculadas de acordo com as expressões (7) e (8). O efeito do solo é representado pela impedância de Carson, $\bar{Z}_g$, calculada de acordo com a equação (6).

$$\bar{Z}_g = R_g + j \times X_g \tag{6}$$

$$\bar{Z}_{ii} = R_{ii} + j \times X_{ii} \tag{7}$$

$$\bar{Z}_{ij} = j \times X_{ij} \tag{8}$$

R_{ii} corresponde ao valor da resistência do condutor i e R_g, X_g, X_{ii} e X_{ij} são calculados de acordo com as equações (9), (10), (11) e (12), abaixo:

$$R_g = \mu_0 \times \frac{\omega}{8}\ [\Omega/m] \tag{9}$$

$$X_g = \mu_0 \times \frac{\omega}{2 \times \pi} \times ln(658.5 \times \frac{\rho}{f})\ [\Omega/m] \tag{10}$$

$$X_{ii} = \mu_0 \times \frac{\omega}{2 \times \pi} \times ln(\frac{1}{GMR_i})\ [\Omega/m] \tag{11}$$

$$X_{ij} = \mu_0 \times \frac{\omega}{2 \times \pi} \times ln(\frac{1}{D_{ij}})\ [\Omega/m] \tag{12}$$

Onde,

- f é a frequência da rede em $Hertz$
- $\omega = 2 \times \pi \times f$ é a frequência angular da rede em rad/s
- GMR_i é o raio médio geométrico do condutor i em m
- D_{ij} é a distância entre os condutores i e j em m
- μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo em H/m
- ρ é a resistividade do solo, considerado uniforme, em $\Omega \times m$, considerada constante

3.1.2 Cálculo da Matriz de Capacitância Nodal

O cálculo da matriz de capacitância nodal é realizado através do método das imagens, representado na Figura 5.

Aplicando esse método, segundo [3], é possível escrever a Equação 13, que apresenta a relação entre as tensões dos condutores medidas a partir do solo e as suas cargas. Essa relação é dada através de uma matriz **P**, chamada de matriz dos coeficientes de potenciais de Maxwell.

$$\begin{bmatrix} V_{condutor A} \\ V_{condutor B} \\ V_{condutor C} \\ V_{condutor N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{AA} & P_{AB} & P_{AC} & P_{AN} \\ P_{AB} & P_{BB} & P_{BC} & P_{BN} \\ P_{AC} & P_{BC} & P_{CC} & P_{CN} \\ P_{AN} & P_{BN} & P_{CN} & P_{NN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Q_{condutor A} \\ Q_{condutor B} \\ Q_{condutor C} \\ Q_{condutor N} \end{bmatrix} \tag{13}$$

Os coeficientes de potenciais de Maxwell são obtidos através da Equação 15 e da Equação 16.

$$\frac{1}{2\pi\varepsilon} = \frac{1}{2 \times \pi \times 8.85 \times 10^{-12}\ F/m} = 17987,41615\ [m/\mu F] \tag{14}$$

$$P_{ii} = 17987,41615 \times ln(\frac{S_{ii}}{RD_i})\ [m/\mu F] \tag{15}$$

$$P_{ij} = 17987,41615 \times ln(\frac{S_{ij}}{D_{ij}})\ [m/\mu F]\ \ ,i \neq j \tag{16}$$

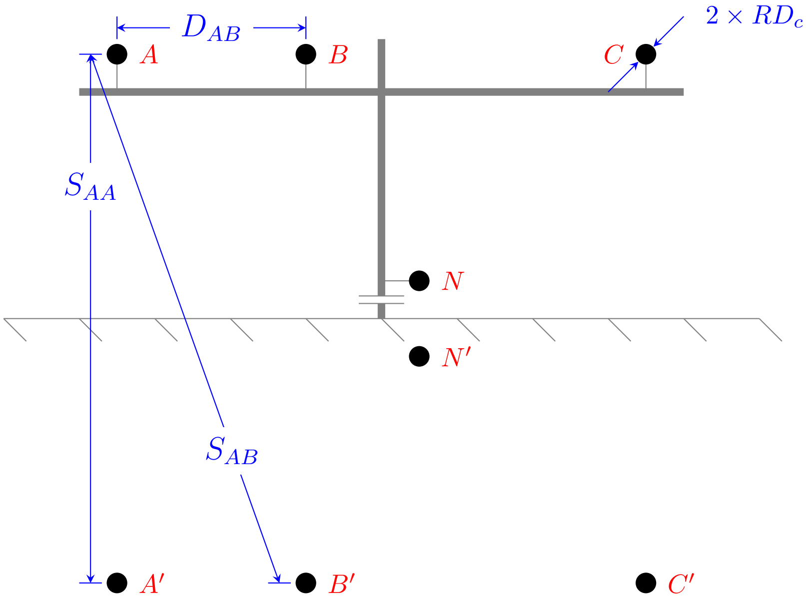

Figura 5: Representação do Método das Imagens

Onde,

- S_{ii} é a distância entre o condutor i e sua imagem, em m
- RD_i é o raio externo do condutor i, em m
- S_{ij} é a distância entre o condutor i e a imagem do condutor j, em m
- D_{ij} é a distância entre os condutores i e j, em m

Por fim, a matriz de capacitância nodal é a inversa da matriz dos coeficientes de potenciais de Maxwell, conforme Equação 17.

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} P_{AA} & P_{AB} & P_{AC} & P_{AN} \\ P_{AB} & P_{BB} & P_{BC} & P_{BN} \\ P_{AC} & P_{BC} & P_{CC} & P_{CN} \\ P_{AN} & P_{BN} & P_{CN} & P_{NN} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{33} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} \end{bmatrix} \tag{17}$$

É importante entender que a matriz de capacitância nodal é uma matriz *shunt*, em que os elementos da diagonal principal são iguais a soma das capacitâncias conectadas ao respectivo condutor, e os elementos fora da diagonal principal são iguais a menos a capacitância mútua entre os respectivos condutores. Assim, a relação entre as capacitâncias C_{ii} e C_{ij} da matriz (17) com as capacitâncias apresentadas no modelo elétrico da Figura 3 é dada por

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} \end{bmatrix} \tag{18}$$

Onde,

$$C_{11} = C_{AA} + C_{AB} + C_{AC} + C_{AN} \tag{19}$$
$$C_{22} = C_{BB} + C_{AB} + C_{BC} + C_{BN} \tag{20}$$
$$C_{33} = C_{CC} + C_{AC} + C_{BC} + C_{CN} \tag{21}$$
$$C_{44} = C_{NN} + C_{AN} + C_{BN} + C_{CN} \tag{22}$$
$$C_{12} = C_{21} = -C_{AB} \tag{23}$$
$$C_{13} = C_{31} = -C_{AC} \tag{24}$$
$$C_{14} = C_{41} = -C_{AN} \tag{25}$$
$$C_{23} = C_{32} = -C_{BC} \tag{26}$$
$$C_{24} = C_{42} = -C_{BN} \tag{27}$$
$$C_{34} = C_{43} = -C_{CN} \tag{28}$$

3.1.3 Parâmetros Elétricos no OpenDSS

O OpenDSS manipula as matrizes **R**, **X** e **C** da linha para a construção de sua matriz de admitância nodal primitiva, que é utilizada em conjunto com as matrizes primitivas dos outros elementos que definem a rede para se obter a matriz de admitância nodal do sistema completo, essencial para a realização dos cálculos como, por exemplo, o fluxo de potência.

As matrizes responsáveis pela definição de uma linha podem ser especificadas de diferentes maneiras, incluindo a utilização de componentes simétricas. Além disso, é possível utilizar dados de condutores e a geometria de uma linha e permitir que as matrizes sejam calculadas internamente pelo OpenDSS. Uma linha pode ser especificada através de 4 modos distintos:

- **Diretamente através dos parâmetros *rmatrix*, *xmatrix* e *cmatrix* ou, utilizando componentes simétricas, através dos parâmetros $\mathbf{R_0}$, $\mathbf{R_1}$, $\mathbf{X_0}$, $\mathbf{X_1}$, $\mathbf{C_0}$ e $\mathbf{C_1}$:** No caso da utilização de componentes simétricas, o OpenDSS converte internamente as impedâncias e as capacitâncias sequenciais em componentes de fase, assumindo que a linha é trifásica e equilibrada.

- **Através do parâmetro *linecode*:** Em sistemas de distribuição, diversas linhas possuem a mesma matriz de impedância série e capacitância nodal. Por esse motivo, o OpenDSS possui o elemento *LineCode*, responsável por armazenar um único conjunto dessas matrizes. Assim, toda vez que se deseja utilizar esse conjunto de matrizes, associa-se o respectivo *LineCode* à linha desejada, através do parâmetro *linecode*.

- **Através do parâmetro *geometry*:** Esse método de especificação de uma linha deve ser utilizado quando se deseja que o OpenDSS calcule as matrizes de impedância série e capacitância nodal através dos dados e da geometria dos condutores, armazenados em um elemento *LineGeometry*. Assim, no parâmetro *geometry*, deve-se especificar um elemento *LineGeometry* previamente definido. Do mesmo modo como no caso anterior, um mesmo *LineGeometry* pode ser utilizado em diferentes linhas.
- **Através dos parâmetros *wires* e *spacing*:** É um método similar ao anterior, porém os dados dos condutores e a geometria da linha são especificados de modo independente, sendo que os primeiros devem ser especificados através do parâmetro *wires*, que deve conter um elemento *WireData* previamente definido, e o último deve ser especificado através do parâmetro *spacing*, que deve conter um elemento *LineSpacing*.

As três primeiras alternativas são apresentadas para a linha trifásica à 4 fios na seções (4.1.1), (4.1.2) e (4.1.3).

3.1.4 Redução de Kron

Em geral, a redução de Kron é aplicada para reduzir o condutor neutro, N. Um caso comum é quando se desejada simplificar o modelo de uma linha trifásica à 4 fios por uma linha trifásica à 3 fios. A Figura 6 apresenta o modelo matemático da linha trifásica à 4 fios reduzida.

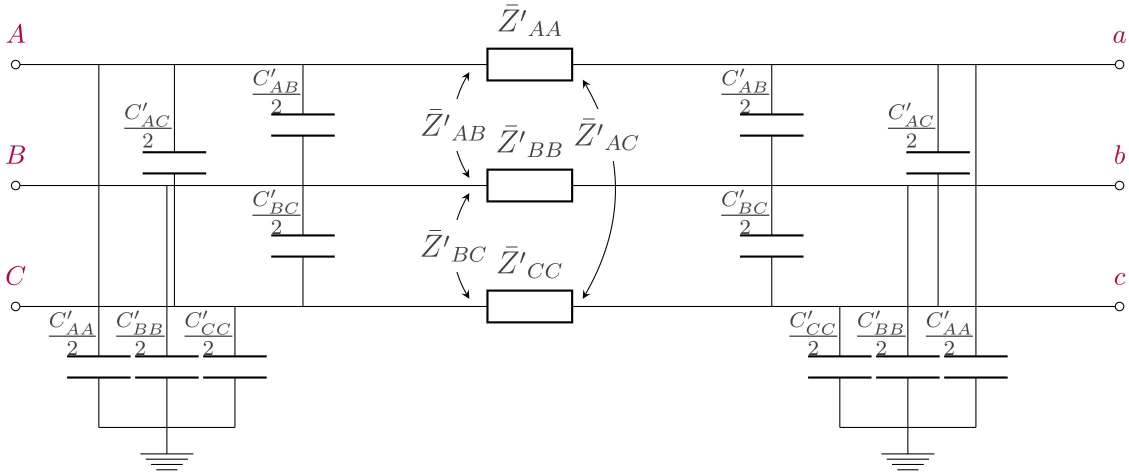

Figura 6: Modelo π de uma Linha Trifásica à 4 Fios Reduzida

Para aplicar a redução de Kron, os terminais do condutor a ser reduzido devem estar aterrados, ou seja, a queda de tensão sobre o mesmo é nula, ou, $\dot{V}_N - \dot{V}_n = 0$. Entretanto, essa condição muitas vezes não é respeitada quando se utiliza esse método. Nesse caso, é preciso ter em mente que um erro é introduzido na solução do fluxo de potência final.

As matrizes $\mathbf{R}'$, $\mathbf{X}'$ e $\mathbf{C}'$, que representam os parâmetros elétricos da linha trifásica à 4 fios reduzida, são obtidas através da aplicação da Equação 29 e da Equação 30 nas matrizes $\bar{\mathbf{Z}}$ e $\mathbf{P}$, que são apresentadas em (3) e (13), respectivamente.

$$\bar{Z}'_{IJ} = \bar{Z}_{IJ} - \frac{\bar{Z}_{IN} \times \bar{Z}_{JN}}{\bar{Z}_{NN}} \tag{29}$$

$$P'_{IJ} = P_{IJ} - \frac{P_{IN} \times P_{JN}}{P_{NN}} \tag{30}$$

Resultando nas matrizes reduzidas apresentadas nas equações (32) e (33).

$$\bar{\mathbf{Z}}' = \mathbf{R}' + j \times \mathbf{X}' \tag{31}$$

$$= \begin{bmatrix} R'_{AA} & R'_{AB} & R'_{AC} \\ R'_{AB} & R'_{BB} & R'_{BC} \\ R'_{AC} & R'_{BC} & R'_{CC} \end{bmatrix} + j \times \begin{bmatrix} X'_{AA} & X'_{AB} & X'_{AC} \\ X'_{AB} & X'_{BB} & X'_{BC} \\ X'_{AC} & X'_{BC} & X'_{CC} \end{bmatrix} \tag{32}$$

$$\mathbf{C}' = \begin{bmatrix} P'_{AA} & P'_{AB} & P'_{AC} \\ P'_{AB} & P'_{BB} & P'_{BC} \\ P'_{AC} & P'_{BC} & P'_{CC} \end{bmatrix}^{-1} \tag{33}$$

Como discutido na seção (3.1.3), essas matrizes podem ser especificadas pelo usuário diretamente nos parâmetros do elemento *Line* ou nos parâmetros do elemento *LineCode*. Entretanto, na seção (4.1.1) é ilustrado como o próprio OpenDSS é capaz de realizar a redução de Kron através da definição do elemento *LineGeometry*.

3.2 Linha Trifásica à 3 Fios

A Figura 7 apresenta o modelo elétrico de uma linha trifásica à 3 fios.

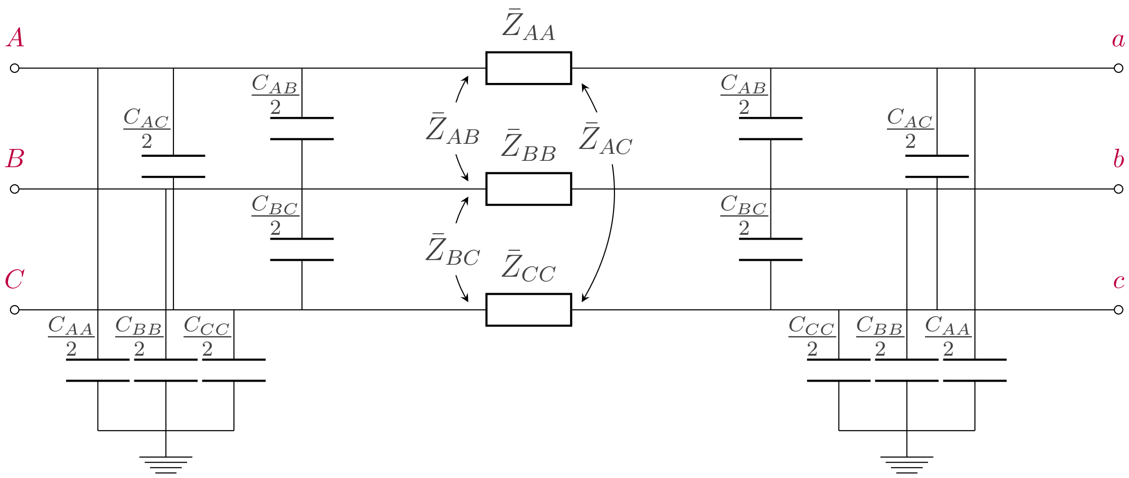

Figura 7: Modelo π de uma Linha Trifásica à 3 Fios

As matrizes **R**, **X** e **C** que caracterizam esse modelo são definidas conforme as equações (34) e (36).

$$\bar{\mathbf{Z}} = \mathbf{R} + j \times \mathbf{X} \tag{34}$$

$$= \begin{bmatrix} R_{AA} & R_{AB} & R_{AC} \\ R_{AB} & R_{BB} & R_{BC} \\ R_{AC} & R_{BC} & R_{CC} \end{bmatrix} + j \times \begin{bmatrix} X_{AA} & X_{AB} & X_{AC} \\ X_{AB} & X_{BB} & X_{BC} \\ X_{AC} & X_{BC} & X_{CC} \end{bmatrix} \tag{35}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{AA} + C_{AB} + C_{AC} & -C_{AB} & -C_{AC} \\ -C_{AB} & C_{BB} + C_{AB} + C_{BC} & -C_{BC} \\ -C_{AC} & -C_{BC} & C_{CC} + C_{AC} + C_{BC} \end{bmatrix} \tag{36}$$

Na seção (4.2.2) é apresentado um exemplo de uma linha trifásica à 3 fios definida no OpenDSS através de suas matrizes *rmatrix*, *xmatrix* e *cmatrix*.

3.2.1 Linha Trifásica Equilibrada

Quando a linha trifásica é completamente transposta, as matrizes **R**, **X** e **C** são apresentadas conforme as equações (37) e (39).

$$\bar{\mathbf{Z}} = \mathbf{R} + j \times \mathbf{X} \tag{37}$$

$$= \begin{bmatrix} R_p & R_m & R_m \\ R_m & R_p & R_m \\ R_m & R_m & R_p \end{bmatrix} + j \times \begin{bmatrix} X_p & X_m & X_m \\ X_m & X_p & X_m \\ X_m & X_m & X_p \end{bmatrix} \tag{38}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_p & C_m & C_m \\ C_m & C_p & C_m \\ C_m & C_m & C_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_p & P_m & P_m \\ P_m & P_p & P_m \\ P_m & P_m & P_p \end{bmatrix}^{-1} \tag{39}$$

Onde as impedâncias e as capacitâncias próprias e mútuas são obtidas de acordo com as expressões abaixo:

$$R_p = \frac{R_{AA} + R_{BB} + R_{CC}}{3} \tag{40}$$

$$R_m = \frac{R_{AB} + R_{BC} + R_{AC}}{3} \tag{41}$$

$$X_p = \frac{X_{AA} + X_{BB} + X_{CC}}{3} \tag{42}$$

$$X_m = \frac{X_{AB} + X_{BC} + X_{AC}}{3} \tag{43}$$

$$P_p = \frac{P_{AA} + P_{BB} + P_{CC}}{3} \tag{44}$$

$$P_m = \frac{P_{AB} + P_{BC} + P_{AC}}{3} \tag{45}$$

3.2.2 Componentes Simétricas

De forma geral, os parâmetros da linha em componentes simétricas podem ser obtidos aplicando-se a Equação 46, para a matriz de impedâncias série, e a Equação 47, para a matriz de capacitância nodal.

$$\mathbf{\bar{Z}_{012}} = \mathbf{A^{-1}} \times \mathbf{\bar{Z}} \times \mathbf{A} \tag{46}$$

$$\mathbf{C_{012}} = \mathbf{A^{-1}} \times \mathbf{C} \times \mathbf{A} \tag{47}$$

onde,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \tag{48}$$

e

$$\alpha = 1\underline{/120°} \tag{49}$$

Entretanto, para o caso em que as matrizes **R**, **X** e **C** representam uma linha equilibrada, ou seja, apresentam a mesma forma vista nas equações (37) e (39), a aplicação de (46) e (47) resulta em (50) e (51), que é uma matriz diagonal.

$$\mathbf{\bar{Z}_{012}} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_p + 2 \times \bar{Z}_m & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_p - \bar{Z}_m & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_p - \bar{Z}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_2 \end{bmatrix} \tag{50}$$

Onde $\bar{Z}_0$, $\bar{Z}_1$ e $\bar{Z}_2$ são definidas como impedâncias de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente. Nesse caso, em especial, $\bar{Z}_1$ é igual a $\bar{Z}_2$. O fato da matriz $\mathbf{\bar{Z}_{012}}$ ser diagonal, no nosso contexto, significa que não há acoplamento entre essas três sequências.

$$\mathbf{C_{012}} = \begin{bmatrix} C_p + 2 \times C_m & 0 & 0 \\ 0 & C_p - C_m & 0 \\ 0 & 0 & C_p - C_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_0 & 0 & 0 \\ 0 & C_1 & 0 \\ 0 & 0 & C_2 \end{bmatrix} \tag{51}$$

Onde C_0, C_1 e C_2 são definidas como capacitâncias de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente.

Conforme comentado anteriormente, esses valores também podem ser utilizados para definir o elemento *Line*. Um exemplo é fornecido na seção (4.2.3).

3.3 Linha Monofásica à 2 Fios

A Figura 8 apresenta a geometria do poste que sustenta uma linha monofásica à 2 fios e a sua representação através do modelo π é exibida na Figura 9. Essa linha é formada por um condutor de fase, B, e um condutor de neutro, N.

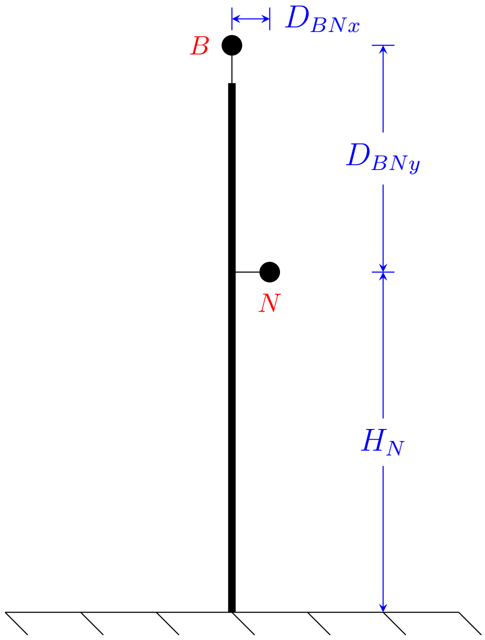

Figura 8: Configuração Geométrica de uma Linha Monofásica à 2 Fios

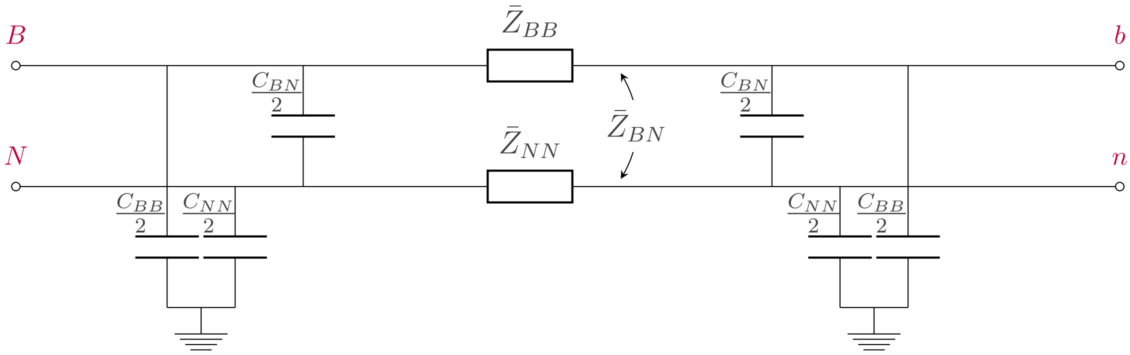

Figura 9: Modelo π de uma Linha Monofásica à 2 Fios

3.3.1 Matrizes de Impedância Série e Capacitância Nodal

As matrizes **R**, **X** e **C** da linha monofásica à 2 fios são apresentadas em (52) e (54). Elas podem ser obtidas seguindo a mesma metodologia apresentada nas seções (3.1.1) e (3.1.2).

$$\bar{\mathbf{Z}} = \mathbf{R} + j \times \mathbf{X} \tag{52}$$

$$= \begin{bmatrix} R_{BB} & R_{BN} \\ R_{BN} & R_{NN} \end{bmatrix} + j \times \begin{bmatrix} X_{BB} & X_{BN} \\ X_{BN} & X_{NN} \end{bmatrix} \tag{53}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{BB} + C_{BN} & -C_{BN} \\ -C_{BN} & C_{NN} + C_{BN} \end{bmatrix} \tag{54}$$

3.3.2 Redução do Fio Neutro

A redução de Kron também pode ser aplicada na situação em que se deseja modelar uma linha à 2 fios por uma à 1 fio. A Figura 10 apresenta o modelo de uma linha monofásica à 2 fios reduzida.

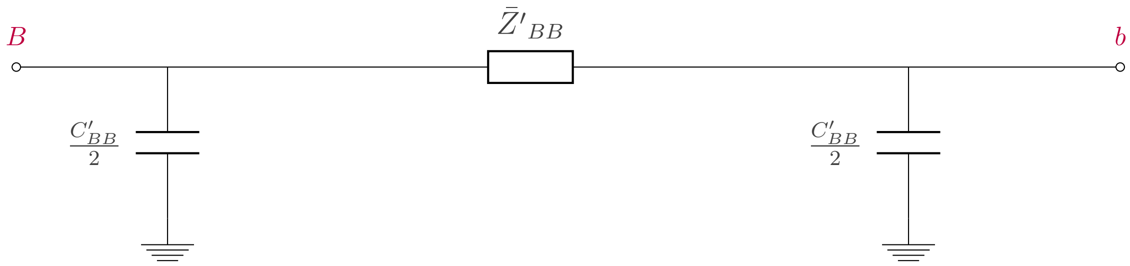

Figura 10: Modelo π de uma Linha Monofásica à 2 Fios Reduzida

A Equação 55 e a Equação 57 apresentam as matrizes $\mathbf{R}'$, $\mathbf{X}'$ e $\mathbf{C}'$ para essa linha após a redução de Kron.

$$\bar{\mathbf{Z}}' = \mathbf{R}' + j \times \mathbf{X}' \tag{55}$$

$$= \begin{bmatrix} R'_{BB} \end{bmatrix} + j \times \begin{bmatrix} X'_{BB} \end{bmatrix} \tag{56}$$

$$\mathbf{C}' = \begin{bmatrix} C'_{BB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P'_{BB} \end{bmatrix}^{-1} \tag{57}$$

Onde,

$$\bar{Z}'_{BB} = \bar{Z}_{BB} - \frac{\bar{Z}_{BN} \times \bar{Z}_{BN}}{\bar{Z}_{NN}} \tag{58}$$

$$\bar{P}'_{BB} = \bar{P}_{BB} - \frac{\bar{P}_{BN} \times \bar{P}_{BN}}{\bar{P}_{NN}} \tag{59}$$

4 Exemplos de Códigos

O objetivo dessa seção é apresentar e explicar alguns códigos na linguagem do OpenDSS que caracterizam as configurações de linha apresentadas nesse documento.

4.1 Exemplo para uma Linha Trifásica à 4 Fios

O exemplo utilizado nessa seção foi retirado da referência [1]. A Figura 2 apresenta a geometria do poste que sustenta uma linha trifásica à 4 fios e as suas distâncias. Os dados dos condutores de fase e de neutro são apresentados a seguir:

- Informação geométrica do poste:
  - $D_{AB} = 2.5\ ft$
  - $D_{BC} = 4.5\ ft$
  - $D_{CNx} = 3.0\ ft$
  - $D_{CNy} = 4.0\ ft$
  - $H_N = 25.0\ ft$
- Condutores de Fase: Área de $336,400$ cmil; Número de fios (Al/Aço) de 26/7; e material *ACSR* ($336,40$ 26/7 *ACSR*).
  - $GMR = 0.0244\ ft$
  - $R = 0.306\ \Omega/mile$
  - $RD = 0.03004\ ft$
  - Capacidade do Condutor: 530 A
- Condutor de Neutro: Área de 4/0 *AWG* ; Número de fios (Al/Aço) de 6/1; e material *ACSR* (4/0 6/1 *ACSR*).
  - $GMR = 0.00814\ ft$
  - $R = 0.592\ \Omega/mile$
  - $RD = 0.02346\ ft$
  - Capacidade do Condutor: 340 A

Nesse exemplo, a linha apresentada na Figura 3 é modelada no OpenDSS, conforme a Figura 11, de três formas distintas:

- Através do parâmetro *geometry*
- Através dos parâmetros *rmatrix*, *xmatrix* e *cmatrix*
- Através do parâmetro *linecode*

4.1.1 Definição de uma Linha Trifásica à 4 Fios Através do parâmetro *geometry*

Os dados dos condutores e a informação geométrica do poste podem ser utilizados diretamente nos elementos *WireData* e *LineGeometry*, respectivamente, para definir o elemento *Line*, conforme apresentado no código a seguir:

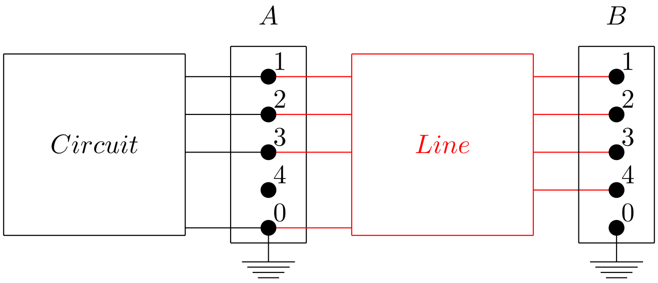

Figura 11: Conexão da Linha Trifásica à 4 fios no OpenDSS

```
Clear

New Circuit.TheveninEquivalente bus1=A pu=1.0 basekv=13.8
~ Z0=[0.000000001, 0.000000001] Z1=[0.000000001, 0.000000001]

New Wiredata.CondutorFase GMR=0.0244 DIAM=0.721 RAC=0.306
~ normamps=530
~ Runits=mi RADunits=in GMRunits=ft

New Wiredata.CondutorNeutro GMR=0.00814 DIAM=0.563 RAC=0.592
~ normamps=340
~ Runits=mi RADunits=in GMRunits=ft

New Linegeometry.Poste nconds=4 nphases=3 reduce=No
~ cond=1 wire=CondutorFase      x= -4     h=29    units=ft
~ cond=2 wire=CondutorFase      x= -1.5   h=29    units=ft
~ cond=3 wire=CondutorFase      x= 3      h=29    units=ft
~ cond=4 wire=CondutorNeutro    x= 0      h=25    units=ft

New Line.MinhaLinha bus1=A.1.2.3.0 bus2=B.1.2.3.4
~ geometry=Poste
~ length=1 units=km
~ earthmodel=Carson

Set voltagebases=[13.8]
Calcvoltagebases

Solve
```

O elemento *WireData* é utilizado para armazenar as informações de cada tipo de condutor: CondutorFase e CondutorNeutro. Para isso, basta inserir diretamente os dados fornecidos no exemplo.

O elemento *LineGeometry* é responsável por posicionar cada condutor no espaço, informar quantos condutores existem (*nconds*) e quais são os condutores de fase. No nosso caso, *nphases=3* significa que 3 dos 4 condutores são de fase. O OpenDSS distingue os condutores de fase e de neutro pela ordem em que eles são definidos. Os primeiros condutores devem ser os de fase e os últimos devem ser os de neutro.

Por fim, a linha é definida através do elemento *Line*, o qual indica a configuração utilizada através do parâmetro *geometry*. No OpenDSS, há 3 opções de correções de Carson disponíveis. O parâmetro *EarthModel = Carson* indica que a metodologia apresentada na seção (3.1.1) deve ser utilizada.

Caso se deseje reduzir essa linha a uma linha trifásica à 3 fios, conforme apresentado na seção (3.1.4), basta alterar o parâmetro *reduce* do elemento *LineGeometry* para *yes* e os parâmetros *bus1* e *bus2*, do elemento *Line*, para *A* ou *A.1.2.3* e *B* ou *B.1.2.3*, respectivamente. Sempre são reduzidos os últimos $nconds - nphases$ condutores declarados. Nesse caso, $nconds - nphases = 1$ e, portanto, apenas o condutor 4(*cond=4*) é reduzido.

4.1.2 Definição da Linha Trifásica à 4 Fios Através dos parâmetros *rmatrix*, *xmatrix* e *cmatrix*

As matrizes **R**, **X** e **C**, calculadas a partir da metodologia apresentada nas seções (3.1.1) e (3.1.2), podem ser utilizadas para definir o elemento *Line*, conforme apresentado no código a seguir:

```
Clear

New Circuit.TheveninEquivalente bus1=A pu=1.0 basekv=13.8
~ Z0=[0.000000001, 0.000000001] Z1=[0.000000001, 0.000000001]

New Line.MinhaLinha bus1=A.1.2.3.0 bus2=B.1.2.3.4 phases=4 length=1 units=km
~ rmatrix = [0.2493624 |0.05921762 0.2493624 |0.05921762 0.05921762 0.2493624
   |0.05921762 0.05921762 0.05921762 0.4270794] !ohm/km
~ xmatrix = [0.8781366 |0.5290833 0.8781366 |0.4514519 0.4847653 0.8781366 |0.4675149
   0.4886856 0.4768213 0.9609082] !ohm/km
~ cmatrix = [9.353608 |-3.028526 9.858712 |-1.160058 -1.928018 8.891634 |-1.393686
   -1.772134 -1.782155 8.809299] !nF/km

Set voltagebases=[13.8]
Calcvoltagebases

Solve
```

As propriedades *rmatrix*, *xmatrix* e *cmatrix* armazenam os elementos do triângulo inferior das matrizes **R**, **X** e **C**, respectivamente.

4.1.3 Definição de uma Linha Trifásica à 4 Fios Através do parâmetro *linecode*

Esse elemento é capaz de armazenar os parâmetros elétricos de uma dada configuração de linha, em $\Omega/Unidades\ de\ Comprimento$ para as impedâncias série e em $nF/Unidades\ de\ Comprimento$ para as capacitâncias. Por exemplo, pode-se imaginar que uma rede é constituída por apenas duas configurações de linha. Nesse caso, dois elementos *LineCode* podem ser definidos e cada linha deve ser associada a um desses elementos, economizando-se assim, uma grande quantidade de código.

As matrizes **R**, **X** e **C**, calculadas a partir da metodologia apresentada nas seções (3.1.1) e (3.1.2), são utilizadas como parâmetros do elemento *LineCode*. O nome desse elemento *LineCode* é utilizado como valor do parâmetro *linecode* do elemento *Line*, conforme apresentado no código a seguir:

```
Clear

New Circuit.TheveninEquivalente bus1=A pu=1.1 basekv=13.8
~ Z0=[0.000000001, 0.000000001] Z1=[0.000000001, 0.000000001]
```

```
New Linecode.MeuArranjo nphases=4 basefreq=60 units=km
~ rmatrix = [0.2493624 |0.05921762 0.2493624 |0.05921762 0.05921762 0.2493624
    |0.05921762 0.05921762 0.05921762 0.4270794] !ohm/km
~ xmatrix = [0.8781366 |0.5290833 0.8781366 |0.4514519 0.4847653 0.8781366 |0.4675149
    0.4886856 0.4768213 0.9609082] !ohm/km
~ cmatrix = [9.353608 |-3.028526 9.858712 |-1.160058 -1.928018 8.891634 |-1.393686
    -1.772134 -1.782155 8.809299] !nF/km
~ neutral=4 kron=No

New Line.LineExample bus1=A.1.2.3.0 bus2=B.1.2.3.4 length=1 units=km linecode=
    MeuArranjo

Set voltagebases=[13.8]
Calcvoltagebases

Solve
```

Caso se deseje reduzir essa linha a uma linha trifásica à 3 fios, ou seja, reduzir o fio neutro especificado pela propriedade *neutral = 4*, basta alterar a propriedade *kron* do elemento *LineCode* para *yes*, e as propriedades *bus1* e *bus2*, do elemento *Line*, para *A* ou *A.1.2.3* e *B* ou *B.1.2.3*, respectivamente.

4.2 Exemplos para uma Linha Trifásica à 3 Fios

Imaginando que na Figura 2 o fio neutro não exista, pode-se considerar que há uma linha trifásica à 3 fios.

Nesse exemplo, a linha apresentada na Figura 7 é modelada no OpenDSS, conforme a Figura 12, de três formas distintas:

- Através do parâmetro *geometry*
- Através dos parâmetros *rmatrix*, *xmatrix* e *cmatrix*
- Através dos parâmetros *R0*, *R1*, *X0*, *X1*, *C0*, *C1*

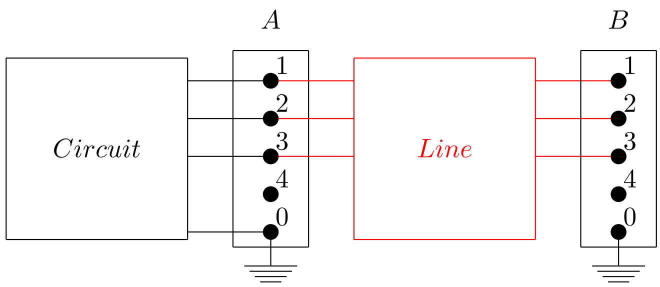

Figura 12: Conexão da Linha Trifásica à 3 fios no OpenDSS

4.2.1 Definição de uma Linha Trifásica à 3 Fios Através parâmetro *geometry*

Os dados dos condutores e a informação geométrica do poste da Figura 2 sem a existência do fio neutro podem ser utilizados diretamente nos elementos *WireData* e *LineGeometry*, respectivamente, conforme apresentado no código a seguir:

```
Clear

New Circuit.TheveninEquivalente bus1=A pu=1.0 basekv=13.8
~ Z0=[0.000000001, 0.000000001] Z1=[0.000000001, 0.000000001]

New Wiredata.CondutorFase GMR=0.0244 DIAM=0.721 RAC=0.306
~ normamps=530
~ Runits=mi RADunits=in GMRunits=ft

New Wiredata.CondutorNeutro GMR=0.00814 DIAM=0.563 RAC=0.592
~ normamps=340
~ Runits=mi RADunits=in GMRunits=ft

New Linegeometry.Poste nconds=3 nphases=3 reduce=No
~ cond=1 wire=CondutorFase    x= -4     h=29    units=ft
~ cond=2 wire=CondutorFase    x= -1.5   h=29    units=ft
~ cond=3 wire=CondutorFase    x= 3      h=29    units=ft


New Line.MinhaLinha bus1=A bus2=B
~ geometry=Poste
~ length=1 units=km
~ earthmodel=Carson

Set voltagebases=[13.8]
Calcvoltagebases

Solve
```

4.2.2 Definição de uma Linha Trifásica à 3 Fios através dos parâmetros *rmatrix*, *xmatrix* e *cmatrix*

As matrizes **R**, **X** e **C**, calculadas a partir da metodologia apresentada nas seções (3.1.1) e (3.1.2), podem ser utilizadas, conforme apresentado no código a seguir:

```
Clear

New Circuit.TheveninEquivalente bus1=A pu=1.0 basekv=13.8
~ Z0=[0.000000001, 0.000000001] Z1=[0.000000001, 0.000000001]

New Line.MinhaLinha bus1=A bus2=B phases=3 length=1 units=km
~ rmatrix = [0.2493624 |0.05921762 0.2493624 |0.05921762 0.05921762 0.2493624] !ohm/
  km
~ xmatrix = [0.8781366 |0.5290833 0.8781366 |0.4514519 0.4847653 0.8781366] !ohm/km
~ cmatrix = [9.133118 |-3.308889 9.502218 |-1.442006 -2.286527 8.531097] !nF/km

Set voltagebases=[13.8]
Calcvoltagebases

Solve
```

4.2.3 Definição de uma Linha Trifásica à 3 Fios Equilibrada através dos parâmetros *rmatrix*, *xmatrix* e *cmatrix* e dos parâmetros *R0*, *R1*, *X0*, *X1*, *C0*, *C1*

Considerando a transposição completa dessa linha, comentada na seção (3.2.1), pode-se obter as matrizes **R**, **X** e **C**, como em (37) e (39). Observer o código a seguir:

```
Clear

New Circuit.TheveninEquivalente bus1=A pu=1.0 basekv=13.8
~ Z0=[0.000000001, 0.000000001] Z1=[0.000000001, 0.000000001]

New Line.MinhaLinha bus1=A bus2=B phases=3 length=1 units=km
~ rmatrix = [0.2493624 |0.05921762 0.2493624 |0.05921762 0.05921762 0.2493624] !ohm/
   km
~ xmatrix = [0.8781366 |0.4884335 0.8781366 |0.4884335 0.4884335 0.8781366] !ohm/km
~ cmatrix = [8.9326856 |-2.290369 8.9326856 |-2.290369 -2.290369 8.9326856] !nF/km

Set voltagebases=[13.8]
Calcvoltagebases

Solve
```

Outra forma de se definir essa linha trifásica à 3 fios equilibrida é através da utilização dos parâmetros da linha em componentes simétricas, conforme metodologia apresentada na seção (3.2.2). O código se encontra a seguir:

```
Clear

New Circuit.TheveninEquivalente bus1=A pu=1.0 basekv=13.8
~ Z0=[0.000000001, 0.000000001] Z1=[0.000000001, 0.000000001]

New Line.MinhaLinha bus1=A bus2=B phases=3 length=1 units=km
~ R0=0.36779764 R1=0.19014478 !ohm/km
~ X0=1.8550036 X1=0.3897031   !ohm/km
~ C0=4.3519476 C1=11.2230546  !nF/km

Set voltagebases=[13.8]
Calcvoltagebases

Solve
```

4.3 Exemplo para uma Linha Monofásica à 2 Fios

O exemplo utilizado nessa seção foi retirado da referência [1]. A Figura 8 apresenta a geometria do poste que sustenta uma linha monofásica à 2 fios e as suas distâncias. Os dados dos condutores de fase e de neutro são apresentados a seguir:

- Informação geométrica do poste:
  - $D_{BNx} = 0.5\ ft$
  - $D_{BNy} = 5.0\ ft$

   - $H_N = 25.0\ ft$

- Condutor de Fase e Condutor de Neutro: Área de $336,400$ cmil; Número de fios (Al/Aço) de 26/7; e material $ACSR$ ($336,40$ 26/7 $ACSR$).
   - $GMR = 0.0244\ ft$
   - $R = 0.306\ \Omega/mile$
   - $RD = 0.03004\ ft$
   - Capacidade do Condutor: 530 A

Nesse exemplo, a linha apresentada na Figura 9 é modelada no OpenDSS, conforme a Figura 13, de três formas distintas:

- Através do parâmetro *geometry*
- Através dos parâmetros *rmatrix*, *xmatrix* e *cmatrix*
- Através do paramêtro *linecode*

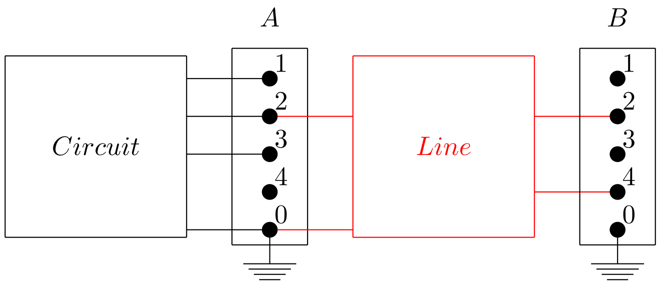

Figura 13: Conexão da Linha Monofásica à 2 fios no OpenDSS

4.3.1 Definição de uma Linha Monofásica à 2 Fios Através do parâmetro *geometry*

O código em linguagem de programação do OpenDSS é apresentado a seguir:

```
Clear

New Circuit.TheveninEquivalente bus1=A pu=1.0 basekv=13.8
~ Z0=[0.000000001, 0.000000001] Z1=[0.000000001, 0.000000001]

New Wiredata.Condutor GMR=0.0244 DIAM=0.721 RAC=0.306
~ normamps=530
~ Runits=mi RADunits=in GMRunits=ft

New Linegeometry.Poste nconds=2 nphases=1 reduce=No
~ cond=1 wire=Condutor     x= 0.0    h=30    units=ft
~ cond=2 wire=Condutor     x= 0.5    h=25    units=ft

New Line.MinhaLinha bus1=A.2.0 bus2=B.2.4
~ geometry=Poste
~ length=1 units=km
~ earthmodel=Carson
```

```
Set voltagebases=[13.8]
Calcvoltagebases

Solve
```

Caso se deseje reduzir essa linha a uma linha monofásica à 1 fio, conforme apresentado na Figura 10, basta alterar a propriedade *reduce*, do elemento *LineGeometry*, para *yes* e as propriedades *bus1* e *bus2*, do elemento *Line*, para *A.2* e *B.2*, respectivamente.

4.3.2 Definição de uma Linha Monofásica à 2 Fios Através apenas do Elemento *Line*

O código é apresentado a seguir:

```
Clear

New Circuit.TheveninEquivalente bus1=A pu=1.0 basekv=13.8
~ Z0=[0.000000001, 0.000000001] Z1=[0.000000001, 0.000000001]

New Line.MinhaLinha bus1=A.2.0 bus2=B.2.4 phases=2 length=1 units=km
~ rmatrix = [0.2493624 |0.05921762 0.2493624]     !ohm/km
~ xmatrix = [0.8781366 |0.4764462 0.8781366]      !ohm/km
~ cmatrix = [8.148138 |-2.628782 8.348427 ]       !nF/km

Set voltagebases=[13.8]
Calcvoltagebases

Solve
```

4.3.3 Definição de uma Linha Monofásica à 2 Fios Através do elemento *LineCode*

O código é apresentado a seguir:

```
Clear

New Circuit.TheveninEquivalente bus1=A pu=1.1 basekv=13.8
~ Z0=[0.000000001, 0.000000001] Z1=[0.000000001, 0.000000001]

New Linecode.MeuArranjo nphases=2 basefreq=60 units=km
~ rmatrix = [0.2493624 |0.05921762 0.2493624]     !ohm/km
~ xmatrix = [0.8781366 |0.4764462 0.8781366]      !ohm/km
~ cmatrix = [8.148138 |-2.628782 8.348427 ]       !nF/km
~ neutral=2 kron=No

New Line.LineExample bus1=A.2.0 bus2=B.2.4 length=1 units=km linecode=MeuArranjo

Set voltagebases=[13.8]
Calcvoltagebases

Solve
```

Caso se deseje reduzir essa linha a uma linha monofásica à 1 fio, ou seja, reduzir o fio neutro especificado pela propriedade *neutral = 2*, basta alterar,a propriedade *kron*, do elemento *linecode*, para *yes* e as propriedades *bus1* e *bus2*, do elemento *line*, para *A.2* e *B.2*, respectivamente.

5 Comentários Adicionais

Esse material foi disponibilizado gratuitamente, porém, ao utilizá-lo, pedimos que as devidas referências sejam feitas.

Se você possui alguma dúvida ou encontrou algum erro nessa nota técnica, por favor, entre em contato conosco através do e-mail **opendss.brasil@gmail.com**.

6 Referências

[1] Kersting, William H.: *Distribution System Modeling and Analysis.* CRC Press, 2012.

[2] Oliveira, C.B., H.P. Schmidt, N. Kagan e E.J. Robba: *Introdução a Sistemas Elétricos de Potência - Componentes Simétricas.* Edgard Blücher, São Paulo, 2ª edição, 2000.

[3] Zanetta Junior, Luiz C.: *Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência.* Editora Livraria da Física, 2005.