Distribuição de Energia Elétrica

Elemento Circuit (Vsource) do OpenDSS

Lucas Melo

Universidade Federal do Ceará

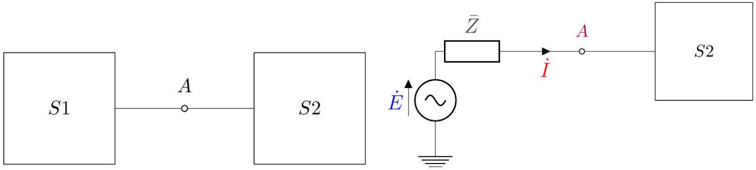
Julho 2024

Objetivos

- **Descrever os principais parâmetros que o OpenDSS utiliza para definir o elemento *Circuit*.**
- **Ultilizar conceitos importantes, comumente apresentados em cursos de sistemas elétricos de potência, como:**
  - Componentes Simétricas;
  - Curto-Circuito Trifásico;
  - CurtoCircuito Monofásico.
- **Apresentar exemplos de códigos na linguagem de programação do OpenDSS.**

Por quê?

- Todo sistema definido no OpenDSS deve conter um elemento específico *Circuit*.
- Tem como função representar qualquer sistema linear visto de um ponto do circuito elétrico por uma fonte de tensão em série com uma impedância.
- Apresentar exemplos de códigos na linguagem de programação do OpenDSS.

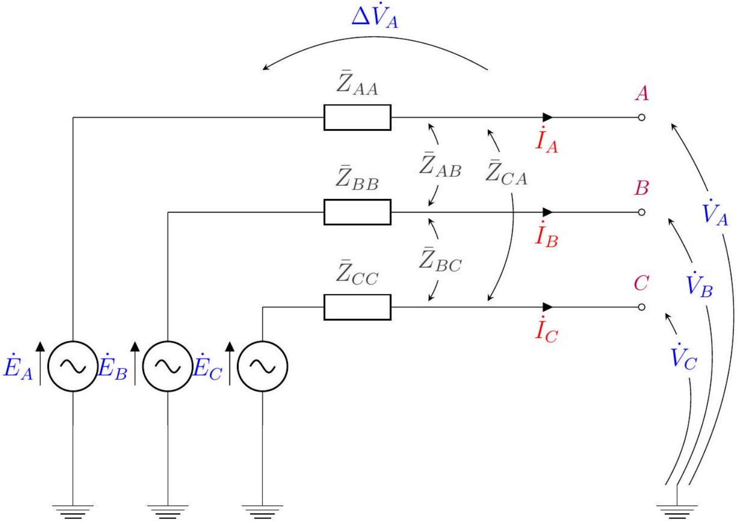


Modelagem

Por definição, esse elemento corresponde a uma fonte de tensão trifásica e simétrica, isto é, três fontes de tensão senoidais de mesma amplitude e defasadas entre si de 120°.

Além disso, as impedâncias próprias e as impedâncias mútuas são iguais entre si, conforme expressão (1), onde $\bar{Z}_p$ e $\bar{Z}_m$ são definidos como impedâncias própria e mútua, respectivamente.

$$
\begin{aligned}
\overline{Z}_p &= \overline{Z}_{AA} = \overline{Z}_{BB} = \overline{Z}_{CC} \\
\overline{Z}_p &= \overline{Z}_{AB} = \overline{Z}_{BC} = \overline{Z}_{CA}
\end{aligned} \tag{1}
$$



$\Delta\dot{V}_A$
$\bar{Z}_{AA}$
A
$\dot{I}_A$
$\bar{Z}_{AB}$
$\bar{Z}_{CA}$
$\bar{Z}_{BB}$
B
$\dot{I}_B$
$\dot{V}_A$
$\bar{Z}_{BC}$
$\bar{Z}_{CC}$
C
$\dot{V}_B$
$\dot{I}_C$
$\dot{E}_A$
$\dot{E}_B$
$\dot{E}_C$
$\dot{V}_C$

Cálculo das Componentes Simétricas das Impedâncias Próprias e Mútuas do Elemento Circuit

As impedâncias em componentes simétricas podem ser utilizadas como parâmetros para definir o elemento Circuit no OpenDSS.

Observando a Figura, é possível escrever três equações da segunda lei de Kirchhoff, uma para cada fase, e obter a Equação 2, na forma matricial.

$$\begin{bmatrix} \Delta V_A \\ \Delta V_B \\ \Delta V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_A \\ E_B \\ E_C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_p & \bar{Z}_m & \bar{Z}_m \\ \bar{Z}_m & \bar{Z}_p & \bar{Z}_m \\ \bar{Z}_m & \bar{Z}_m & \bar{Z}_p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \tag{2}$$

Cálculo das Componentes Simétricas das Impedâncias Próprias e Mútuas do Elemento Circuit

A matriz 3 × 3 das impedâncias de fase também é chamada de $\overline{Z}$:

$$\overline{\mathbf{Z}} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_p & \bar{Z}_m & \bar{Z}_m \\ \bar{Z}_m & \bar{Z}_p & \bar{Z}_m \\ \bar{Z}_m & \bar{Z}_m & \bar{Z}_p \end{bmatrix} \tag{3}$$

A Equação 4 apresenta a relação matemática entre as impedâncias próprias e mútuas e suas componentes simétricas.

$$\overline{\mathbf{Z}}_{012} = \mathbf{A}^{-1} \times \overline{\mathbf{Z}} \times \mathbf{A} \tag{4}$$

Cálculo das Componentes Simétricas das Impedâncias Próprias e Mútuas do Elemento Circuit

Onde A e α são:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$\alpha = 1\underline{/120^\circ} \tag{6}$$

Cálculo das Componentes Simétricas das Impedâncias Próprias e Mútuas do Elemento Circuit

Assim, aplicando-se (3), (5) e (6) em (4), têm-se que:

$$\overline{\mathbf{Z}}_{\mathbf{012}} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_p + 2 \times \bar{Z}_m & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_p - \bar{Z}_m & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_p - \bar{Z}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_2 \end{bmatrix} \tag{7}$$

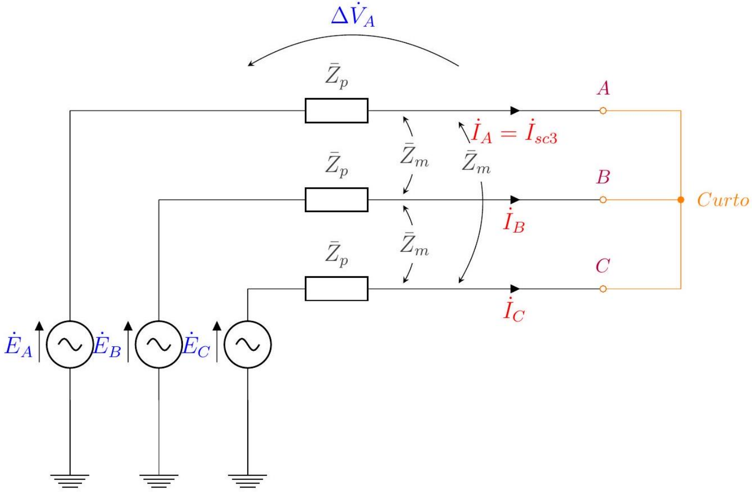
$\bar{Z}_0$, $\bar{Z}_1$ **e** $\bar{Z}_2$ **são definidas como impedâncias de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente. Esses valores podem ser utilizados para definir o elemento Circuit.**

Cálculo da Potência e da Corrente de Curto-Circuito Trifásico

Dica Importante!

Além das impedâncias sequenciais, o par de potências de curto-circuito trifásico e monofásico, $\bar{S}_{sc3}$ e $\bar{S}_{sc1}$, ou o par de correntes de curto-circuito trifásico e monofásico, I_{sc3} e I_{sc1}, também podem ser utilizados para definir o elemento Circuit.

Nessa seção, $\bar{S}_{sc3}$ e I_{sc3} são calculados considerando que o elemento Circuit está na condição de curto-circuito trifásico, conforme apresentado a seguir.



$\Delta\dot{V}_A$
$\bar{Z}_p$
A
$\dot{I}_A = \dot{I}_{sc3}$
$\bar{Z}_m$
$\bar{Z}_m$
$\bar{Z}_p$
B
Curto
$\dot{I}_B$
$\bar{Z}_m$
$\bar{Z}_p$
C
$\dot{I}_C$
$\dot{E}_A$
$\dot{E}_B$
$\dot{E}_C$

Cálculo da Potência e da Corrente de Curto-Circuito Trifásico

Pode-se definir a corrente de curto-circuito trifásico e a tensão de linha entre as fases A e B conforme as relações (8) e (9).

$$I_{sc3} = I_A \tag{8}$$

$$E_{AB} = E_A - E_B = \sqrt{3} \times E_A \underline{/30^\circ} \tag{9}$$

Cálculo da Potência e da Corrente de Curto-Circuito Trifásico

Observando o cricuito do slide passado, é possível escrever a equação da segunda lei de Kirchhoff para a fase A e obter a Equação 11:

$$\Delta V_A = E_A - 0 = \bar{Z}_p \times I_A + \bar{Z}_m \times I_B + \bar{Z}_m \times I_C \tag{10}$$

$$E_A = \bar{Z}_p \times I_A + \bar{Z}_m \times (I_B + I_C) \tag{11}$$

Cálculo da Potência e da Corrente de Curto-Circuito Trifásico

Aplicando a primeira lei de Kirchhoff no nó *Curto*, é possível escrever a Equação 12:

$$I_A + I_B + I_C = 0 \tag{12}$$

$$I_B + I_C = -I_A \tag{13}$$

Assim, aplicando-se (13) em (10) e, também, lembrando que $\bar{Z}_1 = \bar{Z}_p - \bar{Z}_m$, tem-se que:

$$E_A = \left(\bar{Z}_p - \bar{Z}_m\right) \times I_A = \bar{Z}_1 \times I_A \tag{14}$$

Cálculo da Potência e da Corrente de Curto-Circuito Trifásico

A partir da Equação 14, é possível obter o valor do módulo da corrente de curto-circuito trifásico em função da impedância de sequência positiva:

$$I_A = I_{sc3} = \frac{E_A}{\bar{Z}_1} = \frac{E_{AB}\underline{/-30^\circ}}{\sqrt{3} \times \bar{Z}_1} \tag{15}$$

$$|I_A| = \frac{|E_{AB}|}{\sqrt{3} \times |\bar{Z}_1|} \tag{16}$$

Cálculo da Potência e da Corrente de Curto-Circuito Trifásico

A potência de curto-circuito trifásico, por sua vez, é definida como três vezes a potência fornecida por uma das fases, conforme a Equação 18, pois o circuito apresentado é simétrico:

$$\bar{S}_{sc3} = 3 \times E_A \times I_A^* \tag{17}$$

Cálculo da Potência e da Corrente de Curto-Circuito Trifásico

A partir de (15) e (17) é possível obter o valor do módulo da potência de curto-circuito trifásico em função do módulo da impedância de sequência positiva, conforme apresentado na Equação 20.

$$\bar{S}_{sc3} = 3 \times E_A \times \frac{E_A^*}{\bar{Z}_1^*} = \frac{\left(\sqrt{3} \times |E_A|\right)^2}{\bar{Z}_1^*} \tag{18}$$

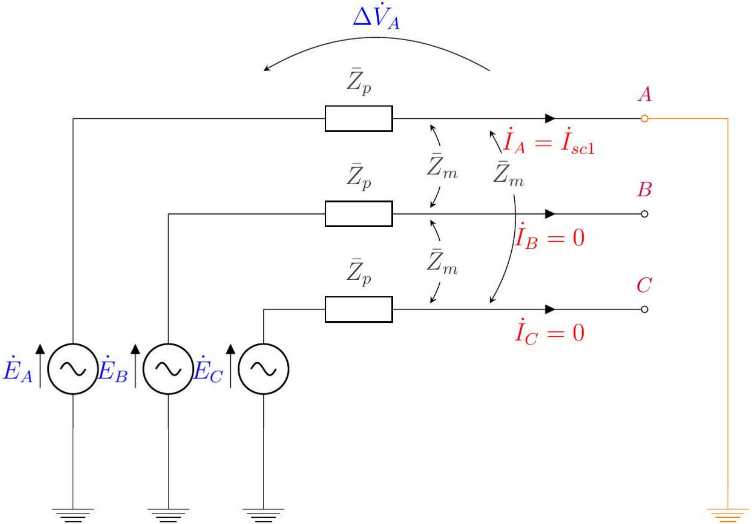
$$\bar{S}_{sc3} = \frac{|E_{AB}|^2}{\bar{Z}_1^*} \tag{19}$$

$$\left|\bar{S}_{sc3}\right| = \frac{|E_{AB}|^2}{\left|\bar{Z}_1\right|} \tag{20}$$

Cálculo da Potência e da Corrente de Curto-Circuito Monofásico

$\bar{S}_{sc1}$ e I_{sc1} são calculados considerando que o elemento Circuit está na condição de curto-circuito monofásico em sua fase A. Pode-se definir a corrente de curto-circuito monofásico conforme a relação (21):

$$I_{sc1} = I_A \tag{21}$$


$\Delta\dot{V}_A$
$\bar{Z}_p$
$\bar{Z}_p$
$\bar{Z}_p$
$\bar{Z}_m$
$\bar{Z}_m$
$\bar{Z}_m$
A
B
C
$\dot{I}_A = \dot{I}_{sc1}$
$\dot{I}_B = 0$
$\dot{I}_C = 0$
$\dot{E}_A$
$\dot{E}_B$
$\dot{E}_C$

Cálculo da Potência e da Corrente de Curto-Circuito Monofásico

Pelo circuito do slide anterior aplicando a segunda lei de Kirchhoff para a fase A, temos que:

$$\Delta V_A = E_A - 0 = \bar{Z}_p \times I_A + \bar{Z}_m \times 0 + \bar{Z}_m \times 0 \tag{22}$$

$$E_A = \bar{Z}_p \times I_A \tag{23}$$

Cálculo da Potência e da Corrente de Curto-Circuito Monofásico

A partir da Equação 23, se obtem o valor do módulo da corrente de curto-circuito monofásico em função do módulo da impedância própria (25):

$$I_A = I_{sc1} = \frac{E_A}{\bar{Z}_p} = \frac{E_{AB}\angle{-30^\circ}}{\sqrt{3} \times \bar{Z}_p} \tag{24}$$

$$|I_A| = \frac{|E_{AB}|}{\sqrt{3} \times |\bar{Z}_p|} \tag{25}$$

Cálculo da Potência e da Corrente de Curto-Circuito Monofásico

A potência de curto-circuito monofásico é definida conforme a Equação 27.

$$\bar{S}_{sc1} = 3 \times E_A \times I_A^* \tag{26}$$

Cálculo da Potência e da Corrente de Curto-Circuito Monofásico

Aplicando-se (24) em (26), obtem-se o valor do módulo da potência de curto-circuito monofásico em função do módulo da impedância própria, conforme apresentado na Equação 29.

$$\bar{S}_{sc1} = 3 \times E_A \times \frac{E_A^*}{\bar{Z}_1^*} = \frac{\left(\sqrt{3} \times |E_A|\right)^2}{\bar{Z}_p^*} \tag{27}$$

$$\bar{S}_{sc1} = \frac{|E_{AB}|^2}{\bar{Z}_p^*} \tag{28}$$

$$\bar{S}_{sc1} = \frac{|E_{AB}|^2}{\left|\bar{Z}_p\right|} \tag{29}$$

Cálculo da Potência e da Corrente de Curto-Circuito Monofásico

Para se obter $\bar{S}_{sc1}$ e I_{sc1} em função de $\bar{Z}_0$ e $\bar{Z}_1$, basta utilizar a relação entre $\bar{Z}_p$ e o par $\bar{Z}_0$ e $\bar{Z}_1$, conforme a Equação 30, derivada a partir das relações encontradas em (7).

$$\bar{Z}_p = \frac{1}{3} \times \bar{Z}_0 + \frac{2}{3} \times \bar{Z}_1 \tag{30}$$

Relação entre os Parâmetros Obtidos

Existem então relações entre pares de parâmetros que podem ser utilizados para a definição do elemento Circuit.

Os pares são:

- $\bar{S}_{sc1}$ **e** $\bar{S}_{sc3}$ **;**
- I_{sc1} **e** I_{sc3} **;**
- $\bar{Z}_0$ **e** $\bar{Z}_1$**.**

Note que não é possível utilizar o par $\bar{Z}_p$ **e** $\bar{Z}_m$ **para definir esse elemento.**

Relação entre os Parâmetros Obtidos

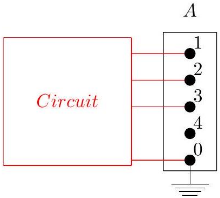
A Equação 31 apresenta as relações entre $\bar{S}_{sc1}$, I_{sc1} e $\bar{Z}_p$. Onde E_{AB} é o valor nominal da tensão de linha do elemento e $\bar{Z}_p$ se relaciona com $\bar{Z}_0$ e $\bar{Z}_1$ através da equação 30:

$$\bar{S}_{sc1} = 3 \times E_A \times I^*_{sc1} = \sqrt{3} \times E_{AB}\underline{/-30^\circ} \times I^*_{sc1} = \frac{|E_{AB}|^2}{\bar{Z}^*_p} \tag{31}$$

A Equação 32 apresenta as relações entre $\bar{S}_{sc3}$, I_{sc3} e $\bar{Z}_1$.

$$\bar{S}_{sc3} = 3 \times E_A \times I^*_{sc3} = \sqrt{3} \times E_{AB}\underline{/-30^\circ} \times I^*_{sc3} = \frac{|E_{AB}|^2}{\bar{Z}^*_1} \tag{32}$$

Códigos - Primeiro Exemplo



- **Nome: TheveninEquivalente**
- **Tensão Nominal:** $|E_{AB}| = 13.8kV$
- **Tensão de Operação:** $|e_A| = 1.1pu$
- **Conectado na Barra: PontoThevenin**
- **Impedância de Sequência Zero:** $\bar{Z}_0 = 0.025862916 + j \times 0.077588748\Omega$
- **Impedância de Sequência Positiva:** $\bar{Z}_1 = 0.023094242 + j \times 0.092376969\Omega$

Definição por impedância

```
Clear
New Circuit . TheveninEquivalente bus1=PontoThevenin pu=1.1 basekv =13.8
-Z0=[0.025862916, 0.077588748] Z1=[0.02309424, 0.092376969]
Set voltagebases =[13.8]
Calcvoltagebases
Solve
```

Definição a partir das Potências de Curto-Circuito

As potências de curto-circuito definem o elemento Circuit, e são calculadas usando equações (20), (29) e (31). Uma vez calculadas, os valores das impedâncias não são fornecidos; em vez disso, eles são obtidos usando as relações nas equações (20) e (29).

$$\bar{Z}_p = \frac{1}{3} \times \bar{Z}_0 + \frac{2}{3} \times \bar{Z}_1 \tag{33}$$

$$= \frac{1}{3} \times (0.025862916 + j \times 0.077588748) + \frac{2}{3} \times (0.023094242 + j \times 0.092376969) \tag{34}$$

$$= (0.002401713 + j \times 0.087447562)\Omega \tag{35}$$

Definição a partir das Potências de Curto-Circuito

$$\bar{S}_{sc1} = \frac{|E_{AB}|^2}{\bar{Z}_p^*} = \frac{13.8^2}{(0.002401713 - j \times 0.087447562)} \tag{36}$$

$$= 2100/74.6426^\circ MVA \tag{37}$$

$$\bar{S}_{sc3} = \frac{|E_{AB}|^2}{\bar{Z}_1^*} = \frac{13.8^2}{0.023094242 - j \times 0.092376969} \tag{38}$$

$$= 2000/75.9638^\circ MVA \tag{39}$$

Definição a partir das Potências de Curto-Circuito

O OpenDSS aceita apenas os módulos das potências de curto-circuito como entrada. Os ângulos das potências de curto-circuito são inseridos indiretamente usando o parâmetro *x1r1*, que representa a relação $\frac{X_1}{R_1}$, onde R_1 e X_1 são valores de resistência e reatância de sequência positiva. Com isso, as impedâncias de sequência positiva e as potências de curto-circuito trifásicas podem ser definidas usando as equações (41) e (42).

$$\bar{Z}_1 = R_1 + j \times X_1 = \left|\bar{Z}_1\right| \underline{/\varphi_1} \tag{40}$$

$$\bar{S}_{sc3} = \frac{\left|E_{AB}\right|^2}{\left|\bar{Z}_1\right| \underline{/-\varphi_1}} = \left|\bar{S}_{sc3}\right| \underline{/\varphi_1} \tag{41}$$

Definição a partir das Potências de Curto-Circuito

A inclusão do valor do ângulo da potência de curto-circuito trifásico através do parâmetro $x1r1$ deve ser realizada conforme a Equação 43.

$$x1r1 = \frac{X_1}{R_1} = \tan\left(\varphi_1\right) = \tan\left(75.9638^\circ\right) = 4 \tag{42}$$

Para incluir o valor do ângulo da potência de curto-circuito monofásico é necessário utilizar o parâmetro $x0r0$, que representa a relação $\frac{X_0}{R_0}$. Dessa maneira, $\bar{Z}_0$ deve ser calculado a partir dos dados das potências de curto-circuito. Primeiro, calcula-se o valor de $\bar{Z}_1$ através da Equação 44.

$$\bar{Z}_1 = \frac{\left|E_{AB}\right|^2}{\bar{S}^*_{sc3}} = \frac{13.8^2}{2000\underline{/-75.9638^\circ}} \tag{43}$$
$$= 0.023094242 + j \times 0.092376969\Omega$$

Definição a partir das Potências de Curto-Circuito

Calcula-se o valor de $\bar{Z}_p$ através da Equação 46 .

$$\bar{Z}_p = \frac{|E_{AB}|^2}{\bar{S}^*_{sc1}} = \frac{13.8^2}{2100\underline{/-74.6426^\circ}} \tag{44}$$

$$= 0.002401713 + j \times 0.087447562\Omega \tag{45}$$

Com os valores de $\bar{Z}_1$ e $\bar{Z}_p$, calcula-se o valor de $\bar{Z}_0$ através da Equação 48, que é resultado de uma manipulação matemática da Equação 31.

$$\bar{Z}_0 = 3 \times \bar{Z}_p - 2 \times \bar{Z}_1 \tag{46}$$

$$= 0.025862916 + j \times 0.077588748\Omega \tag{47}$$

Definição a partir das Potências de Curto-Circuito

Por fim, a relação $\frac{X_0}{R_0}$ é calculada conforme a Equação 50.

$$xoro = \frac{X_0}{R_0} = \frac{0.077588748}{0.025862916} = 3 \tag{48}$$

O codigo a partir das pontências de Curto-ciricuito:

```
Clear
New Circuit . TheveninEquivalente bus1=PontoThevenin pu=1.1 basekv =13.8
-MVAsc3=2000 X1R1=4 MVAsc1=2100 X0R0=3
Set voltagebases =[13.8]
Calcvoltagebases
Solve
```

```
Clear
New Circuit . TheveninEquivalente bus1=PontoThevenin pu=1.1 basekv =13.8
-MVAsc3=2000 X1R1=4 MVAsc1=2100 X0R0=3
Set voltagebases =[13.8]
Calcvoltagebases
Solve
```

Definição a partir das Correntes de Curto-Circuito

Para definir o mesmo elemento da seção (4.1.1), os dados das correntes de curto-circuito são obtidos através das equações (32) e (33).

$$I_{sc1} = 87858/{-74.6426}^{\circ} A \tag{49}$$

$$I_{sc3} = 83674\angle -75.9638^{\circ} A \tag{50}$$

Do mesmo modo que as potências de curto-circuito, a definição do elemento Circuit também é realizada através dos módulos das correntes de curto-circuito e das relações $\frac{X_0}{R_0}$ e $\frac{X_1}{R_1}$. Assim sendo, com os dados das correntes de curto-circuito I_{sc1} e I_{sc1}, calcula-se as potências de curto-circuito através das equações (32) e (33) e, portanto, o método para obtenção das relações $\frac{X_0}{R_0}$ e $\frac{X_1}{R_1}$ apresentado na seção (4.1.2) pode ser utilizado.

```
Clear
New Circuit . TheveninEquivalente bus1=PontoThevenin pu=1.1 basekv =13.8
-Isc3=83674 X1R1=4 Isc1=87858 X0R0=3
Set voltagebases =[13.8]
Calcvoltagebases
Solve
```

Segundo Exemplo

Esse exemplo tem o objetivo de apresentar como se deve definir o elemento Circuit na condição de barramento infinito, ou seja, com tensão nominal em seu terminal de saída independente da potência fornecida pelo elemento.

Para esse exemplo, é assumido que o equivalente de Thévenin trifásico apresenta os seguintes dados:

- **Nome: TheveninEquivalente**
- **Tensão Nominal:** $|E_{AB}| = 13.8\mathrm{kV}$
- **Tensão de Operação:** $|e_A| = 1.1pu$
- **Conectado na Barra: PontoThevenin**
- **Operando como Barramento Infinito**

```
Clear
New Circuit . TheveninEquivalente bus1=PontoThevenin pu=1.1 basekv =13.8
-Z0=[0.000000001, 0.000000001] Z1=[0.000000001, 0.000000001]
Set voltagebases =[13.8]
Calcvoltagebases
Solve
```