

Linhas de Transmissão

PEA5732 - Modelagem de Componentes de
Sistemas Elétricos de Potência para Cálculos
Elétricos.

Prof. Dr. Silvio Giuseppe Di Santo

Cálculo de Parâmetros

- **Resistência**

- Principal responsável por perdas na LT.
- Resistência efetiva:

$$R = \frac{\text{Perda de potência no cond.}}{|I|^2} \Omega$$

- Resistência DC:

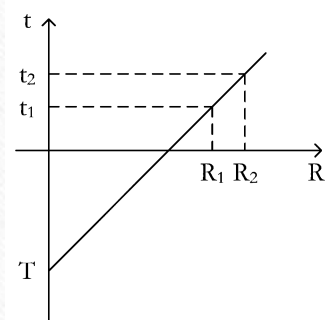
$$R_{dc} = \frac{\rho \ell}{A} \Omega$$

ρ = resistividade do condutor;
 ℓ = comprimento;
 A = área da seção transversal.

- Resistência efetiva = resistência DC quando a corrente é uniformemente distribuída.

Cálculo de Parâmetros

- Valores típicos de resistividade (20°C):
 - Cobre duro: $1,77 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ e Alumínio: $2,83 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$.
- Variação da resistência com a temperatura:



$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{T + t_2}{T + t_1}$$

Valores típicos de T (°C):

- Cobre recozido: 234.5;
- Cobre duro: 241;
- Alumínio: 228.

- Efeito pelicular (“skin”): A resistência efetiva aumenta com o aumento da frequência da corrente. Maior parte da corrente passa pela superfície do condutor. Tabela de fabricantes fornecem a relação R/R_{dc} .

Cálculo de Parâmetros

- **Indutância**

- Relação entre fluxo concatenado e corrente.
- Há fluxo tanto interno quanto externo ao condutor
- Indutância interna:

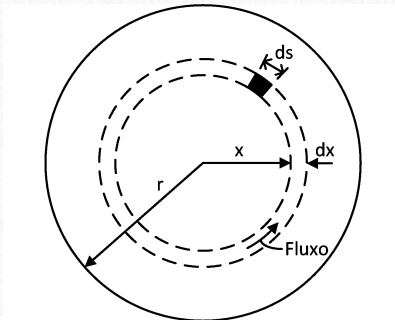


Fig2. Seção transversal de um condutor. Fonte: Grainger, 1994

$$\mathcal{F} = \oint \vec{H} \cdot d\vec{s} = I \text{ (Ae)}$$

\mathcal{F} : Força magnetomotriz (Ae)

\vec{H} : Intensidade de campo magnético (Ae/m)

\vec{s} : Vetor comprimento (m)

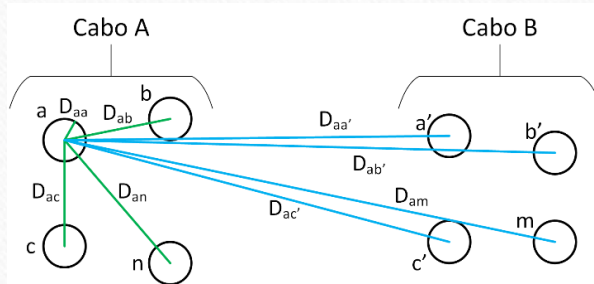
I : Corrente concatenada (A)

Fluxo concatenado interno: $\lambda_{int} = \frac{I}{2} \times 10^{-7} \text{ Wbe/m}$

Indutância interna: $L_{int} = \frac{\lambda_{int}}{I} = \frac{1}{2} \times 10^{-7} \text{ H/m}$

Cálculo de Parâmetros

- Indutância total



Indutância total de um condutor qualquer:

$$L = \left(\frac{1}{2} + 2 \times \ln \frac{D}{r} \right) \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

Raio do condutor fictício (com fluxo interno igual a zero):

$$D_{aa} = r_a e^{-1/4}$$

Indutância total do cabo A (no caso onde a soma das correntes nos conds. sejam iguais a zero):

$$L_A = 2 \times 10^{-7} \times \ln \frac{D_m}{D_s} \text{ H/m}$$

$$D_m = \sqrt[n]{(D_{aa'} D_{ab'} D_{ac'} \cdots D_{am'}) \cdots (D_{na'} D_{nb'} D_{nc'} \cdots D_{nm'})} \quad \text{Distância média geométrica (DMG)}$$

$$D_s = \sqrt[n^2]{(D_{aa} D_{ab} D_{ac} \cdots D_{an}) \cdots (D_{na} D_{nb} D_{nc} \cdots D_{nn})} \quad \text{Raio médio geométrico (RMG)}$$

Cálculo de Parâmetros

- Para linha trifásica transposta:

$$D_m = D_{eq} = \sqrt[3]{(D_{AB}D_{BC}D_{CA})}$$

- Uso de tabelas de fabricantes: (desconsiderando o efeito da terra)
 - Usada a reatância ao invés de indutância.

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi f \times 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_m}{D_s} = 4\pi f \times 10^{-7} \ln \frac{D_m}{D_s} \text{ } \Omega/\text{m}$$

$$X_L = 2,022 \times 10^{-3} f \ln \frac{1}{D_s} + 2,022 \times 10^{-3} f \ln D_m \text{ } \Omega/\text{mi}$$

- Primeira parte (X_a): Reatância indutiva à 1ft. ([Tabelado](#))
- Segunda parte (X_d): Reatância indutiva de fator de espaçamento. ([Tabelado](#))

Cálculo de Parâmetros

- Vários condutores por fase (bundled):

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_{eq}}{D_s^b} \text{ H/m}$$

- Para dois condutores por fase:

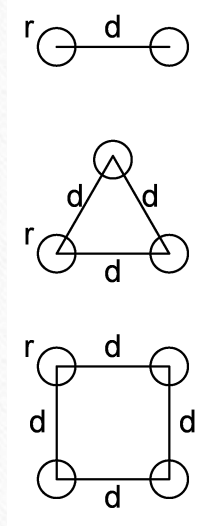
$$D_s^b = \sqrt{D_s \times d}$$

- Para três condutores por fase:

$$D_s^b = \sqrt[3]{D_s \times d^2}$$

- Para quatro condutores por fase:

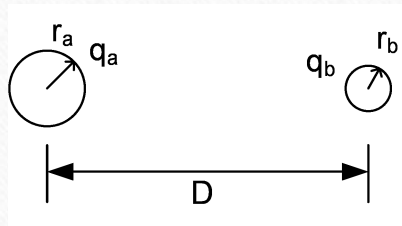
$$D_s^b = 1,09 \sqrt[4]{D_s \times d^3}$$



Cálculo de Parâmetros

Capacitância

- Relação entre carga elétrica e diferença de potencial.
- Linha monofásica (sendo $q_b = -q_a$):



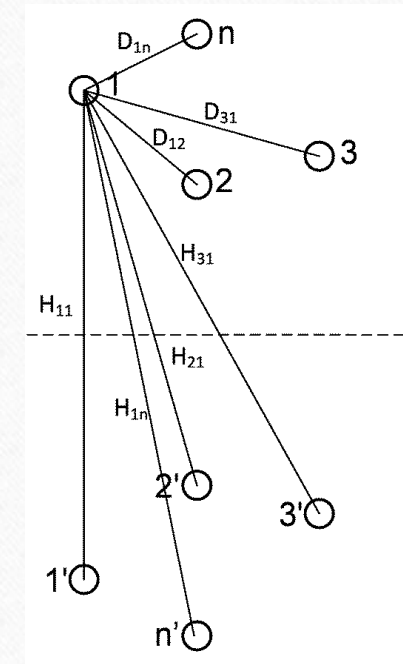
$$C_{ab} = \frac{q_a}{V_{ab}} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(D^2/r_a r_b)} \text{ F/m} \quad r_a = r_b \rightarrow C_{ab} = \frac{\pi\epsilon}{\ln(D/r)} \text{ F/m}$$

Por fase: $C_{an} = C_{bn} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(D/r)} \text{ F/m}$

- Linha trifásica (considerando efeito da terra – capacitância média por fase → $q_a + q_b + q_c = 0$ e tensões equilibradas – desconsiderando o cabo-guarda n):

$$C_n = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(D_{eq}/r) - \ln\left(\frac{\sqrt[3]{H_{12}H_{23}H_{31}}}{\sqrt[3]{H_1H_2H_3}}\right)} \text{ F/m}$$

Onde: $D_{eq} = \sqrt[3]{(D_{12}D_{23}D_{31})}$



Cálculo de Parâmetros

- Uso de tabela de fabricantes (da mesma forma da indutância).

$$X_C = \underbrace{\frac{1,779}{f} \times 10^6 \ln \frac{1}{r}}_{X'_a} + \underbrace{\frac{1,779}{f} \times 10^6 \ln D_{eq}}_{X'_d} \Omega/\text{mi}$$

- Vários condutores por fase (bundled):

$$C_n = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(D_{eq}/D_{sC})} \text{ F/m}$$

- Para dois condutores por fase:

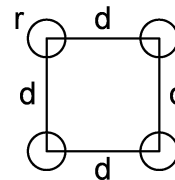
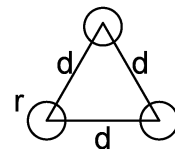
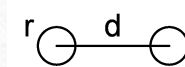
$$D_{sC} = \sqrt{rd}$$

- Para três condutores por fase:

$$D_{sC} = \sqrt[3]{rd^2}$$

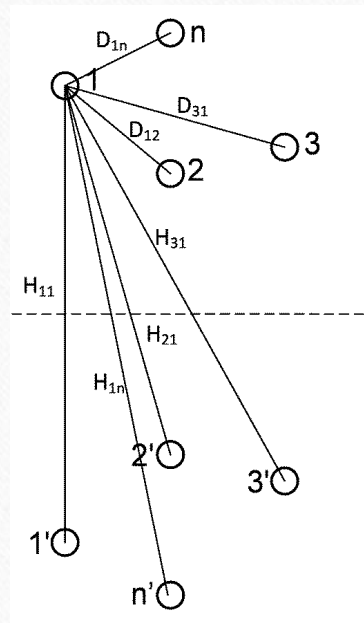
- Para quatro condutores por fase:

$$D_{sC} = 1,09 \sqrt[4]{rd^3}$$



Cálculo de Parâmetros

- Usando notação matricial (caso geral: correntes arbitrárias nos condutores):
 - Considerar o efeito do solo e cabos-guarda;
 - As alturas h , são alturas médias calculadas da seguinte forma:
$$h = h_t - \frac{2}{3}f \text{ (} h_t: \text{ altura do cond. na torre | } f: \text{ flecha).}$$
$$f = h_t - h_{\min}, h = H/2$$
 - Deve-se utilizar o método das imagens para o cálculo da imp. série e da capacitância.



Cálculo de Parâmetros

- Cálculo da impedância série:
 - Considerando que: $\sum_i I_i = 0$
 - Os fluxos concatenados com os condutores são:

$$\lambda_a = 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{H_{11}}{D_s} + I_b \ln \frac{H_{12}}{D_{12}} + I_c \ln \frac{H_{31}}{D_{31}} + I_{cg} \ln \frac{H_{1cg}}{D_{1cg}} \right) \text{ Wbe/m}$$

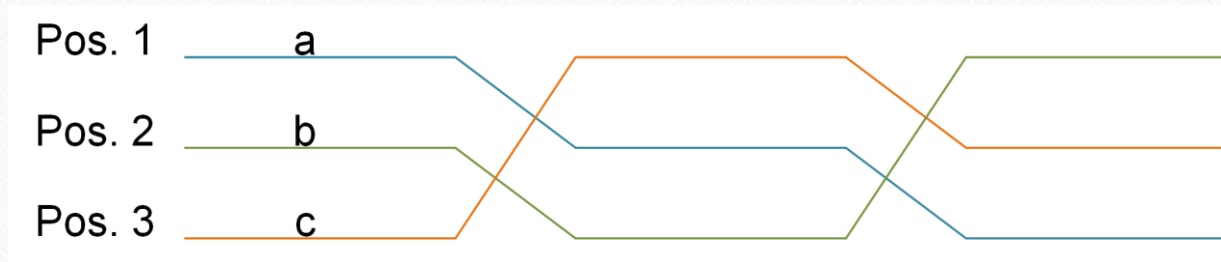
$$\lambda_b = 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{H_{12}}{D_{12}} + I_b \ln \frac{H_{22}}{D_s} + I_c \ln \frac{H_{23}}{D_{23}} + I_{cg} \ln \frac{H_{2cg}}{D_{2cg}} \right) \text{ Wbe/m}$$

$$\lambda_c = 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{H_{31}}{D_{31}} + I_b \ln \frac{H_{23}}{D_{23}} + I_c \ln \frac{H_{33}}{D_s} + I_{cg} \ln \frac{H_{3cg}}{D_{3cg}} \right) \text{ Wbe/m}$$

$$\lambda_{cg} = 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{H_{1cg}}{D_{1cg}} + I_b \ln \frac{H_{2cg}}{D_{2cg}} + I_c \ln \frac{H_{3cg}}{D_{3cg}} + I_{cg} \ln \frac{H_{cgcg}}{D_{scg}} \right) \text{ Wbe/m}$$

Cálculo de Parâmetros

- Considerando a LT transposta:



- Considerando o fluxo concatenado com a fase a:

$$\lambda_{a1} = 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{H_{11}}{D_s} + I_b \ln \frac{H_{12}}{D_{12}} + I_c \ln \frac{H_{31}}{D_{31}} + I_{cg} \ln \frac{H_{1cg}}{D_{1cg}} \right) \text{ Wbe/m}$$

$$\lambda_{a2} = 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{H_{22}}{D_s} + I_b \ln \frac{H_{23}}{D_{23}} + I_c \ln \frac{H_{13}}{D_{13}} + I_{cg} \ln \frac{H_{2cg}}{D_{2cg}} \right) \text{ Wbe/m}$$

$$\lambda_{a3} = 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{H_{33}}{D_s} + I_b \ln \frac{H_{31}}{D_{31}} + I_c \ln \frac{H_{23}}{D_{23}} + I_{cg} \ln \frac{H_{3cg}}{D_{3cg}} \right) \text{ Wbe/m}$$

Cálculo de Parâmetros

- Determina-se o fluxo médio da fase a:

$$\lambda_a = \frac{\lambda_{a1} + \lambda_{a2} + \lambda_{a3}}{3}$$

$$\lambda_a = 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{\sqrt[3]{H_{11}H_{22}H_{33}}}{D_s} + I_b \ln \frac{\sqrt[3]{H_{12}H_{23}H_{31}}}{\sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}}} + I_c \ln \frac{\sqrt[3]{H_{12}H_{23}H_{31}}}{\sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}}} + I_{cg} \ln \frac{\sqrt[3]{H_{1cg}H_{2cg}H_{3cg}}}{\sqrt[3]{D_{1cg}D_{2cg}D_{3cg}}} \right) \text{ Wbe/m}$$

- Para as demais fases e o cabo-guarda:

$$\lambda_b = 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{\sqrt[3]{H_{12}H_{23}H_{31}}}{\sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}}} + I_b \ln \frac{\sqrt[3]{H_{11}H_{22}H_{33}}}{D_s} + I_c \ln \frac{\sqrt[3]{H_{12}H_{23}H_{31}}}{\sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}}} + I_{cg} \ln \frac{\sqrt[3]{H_{1cg}H_{2cg}H_{3cg}}}{\sqrt[3]{D_{1cg}D_{2cg}D_{3cg}}} \right) \text{ Wbe/m}$$

$$\lambda_c = 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{\sqrt[3]{H_{12}H_{23}H_{31}}}{\sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}}} + I_b \ln \frac{\sqrt[3]{H_{12}H_{23}H_{31}}}{\sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}}} + I_c \ln \frac{\sqrt[3]{H_{11}H_{22}H_{33}}}{D_s} + I_{cg} \ln \frac{\sqrt[3]{H_{1cg}H_{2cg}H_{3cg}}}{\sqrt[3]{D_{1cg}D_{2cg}D_{3cg}}} \right) \text{ Wbe/m}$$

$$\lambda_{cg} = 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{\sqrt[3]{H_{1cg}H_{2cg}H_{3cg}}}{\sqrt[3]{D_{1cg}D_{2cg}D_{3cg}}} + I_b \ln \frac{\sqrt[3]{H_{1cg}H_{2cg}H_{3cg}}}{\sqrt[3]{D_{1cg}D_{2cg}D_{3cg}}} + I_c \ln \frac{\sqrt[3]{H_{1cg}H_{2cg}H_{3cg}}}{\sqrt[3]{D_{1cg}D_{2cg}D_{3cg}}} + I_{cg} \ln \frac{H_{cgcg}}{D_{scg}} \right) \text{ Wbe/m}$$

Cálculo de Parâmetros

- A queda de tensão nas fases e no cabo guarda são:

$$\Delta V_a = r_a i_a + \frac{d\lambda_a}{dt} \quad \Delta V_b = r_b i_b + \frac{d\lambda_b}{dt} \quad \Delta V_c = r_c i_c + \frac{d\lambda_c}{dt} \quad \Delta V_{cg} = r_{cg} i_{cg} + \frac{d\lambda_{cg}}{dt}$$

- Passando para o domínio da freq. e resolvendo as equações:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_a \\ \Delta V_b \\ \Delta V_c \\ \Delta V_{cg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_{cg} \end{bmatrix} + j\omega \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{acg} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bcg} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & L_{ccg} \\ L_{cga} & L_{cgb} & L_{cgc} & L_{cgcg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_{cg} \end{bmatrix}$$

- Considerando o cabo-guarda aterrado através das torres: $\Delta V_{cg} = 0$
- Pode-se utilizar a redução da Kron para eliminar o cabo-guarda da equação.
- Eliminação de um condutor k:

$$A_{ij}^{novo} = A_{ij} - \frac{A_{ik} A_{kj}}{A_{kk}}$$

Cálculo de Parâmetros

- Aplicada a redução de Kron e considerando o fato de os condutores de fase serem idênticos e a LT transposta:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_a \\ \Delta V_b \\ \Delta V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_p & z_m & z_m \\ z_m & z_p & z_m \\ z_m & z_m & z_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \text{ V}$$

- Onde:

$$z_p = (r + \alpha^2 r_{cg}) + j(x_p - \alpha^2 x_{cg}) \text{ } \Omega/\text{m}$$

$$z_m = \alpha^2 r_{cg} + j(x_m - \alpha^2 x_{cg}) \text{ } \Omega/\text{m}$$

- E:

$$\alpha^2 = \frac{x_{fcg}^2}{r_{cg}^2 + x_{cg}^2}$$

Relação de transformação: LT com cabo-guarda é comparável à um trafo em curto-circuito.

- Em comp. simétricas:

$$z_0 = z_p + 2z_m = (r + 3\alpha^2 r_{cg}) + j(x_p + 2x_m - 3\alpha^2 x_{cg}) \Omega/\text{m}$$

$$z_1 = z_p - z_m = r + j(x_p - x_m) \Omega/\text{m}$$

Cálculo de Parâmetros

- Resistividade do solo não-nula:
 - Neste caso deve-se aplicar a correção de Carson no cálculo da impedância série da LT.
 - Dependendo da frequência da corrente que percorre o solo, esta se distribuirá de maneira diferente. Quanto maior for a frequência a corrente se aproxima mais da superfície do solo.

- Então:

$$z_{ij} = (r_{ij} + \Delta r_{ij}) + j \left(2\omega \times 10^{-7} \ln \frac{H_{ij}}{D_s} + \Delta x_{ij} \right) \Omega/m$$

$$z_{ij} = \Delta r_{ij} + j \left(2\omega \times 10^{-7} \ln \frac{H_{ij}}{D_{ij}} + \Delta x_{ij} \right) \Omega/m$$

- Considerando resistividade nula:

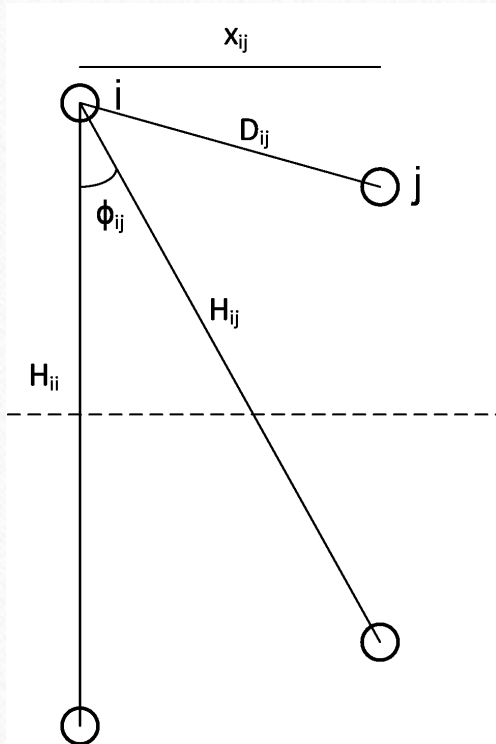
$$\Delta r_{ij} = \Delta r_{ij} = 0$$

$$\Delta x_{ij} = \Delta x_{ij} = 0$$

- Para resistividade do solo não nula, a correção de Carson é (de forma simplificada):

Cálculo de Parâmetros

- Para resistividade do solo não nula, a correção de Carson para $a < 5$ é:



$$\Delta r = 4\omega \times 10^{-4} \left\{ \frac{\pi}{8} - b_1 a \cos \phi + b_2 [(c_2 - \ln a) a^2 \cos 2\phi + \phi a^2 \sin 2\phi] + b_3 a^3 \cos 3\phi - d_4 a^4 \cos 4\phi - b_5 a^5 \cos 5\phi + \dots \right\} (\Omega / \text{km})$$

$$\Delta x = 4\omega \times 10^{-4} \left\{ \frac{1}{2} (0.6159315 - \ln a) + b_1 a \cos \phi - d_2 a^2 \cos 2\phi + b_3 a^3 \cos 3\phi - b_4 [(c_4 - \ln a) a^4 \cos 4\phi + \phi a^4 \sin 4\phi] + b_5 a^5 \cos 5\phi + \dots \right\} (\Omega / \text{km})$$

- Onde:

$$a = 4\pi\sqrt{5} * 10^{-4} H\sqrt{f/\rho}$$

$H = H_{ii}$ Para a impedância própria

$H = H_{ij}$ Para a impedância mútua

Cálculo de Parâmetros

$$b_1 = \frac{\sqrt{2}}{6} \quad b_2 = \frac{1}{16} \quad c_2 = 1.3659315$$

$$b_i = b_{i-2} \frac{\text{sinal}}{i(i+2)}$$

$$c_i = c_{i-2} + \frac{1}{i} + \frac{1}{i+2}$$

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

$$\cos \phi_{ij} = \frac{(H_{ij} + H_{jj})/2}{H_{ij}}$$

$$\sin \phi_{ij} = \frac{x_{ij}}{H_{ij}}$$

- Onde: sinal alterna a cada quatro termos, sendo +1 para $i=1,2,3$ e 4 ; -1 para $i=5,6,7,8$; etc.
- Para $a > 5$:

$$\Delta r = \frac{4\omega \times 10^{-4}}{\sqrt{2}} \left(\frac{\cos \phi}{a} - \frac{\sqrt{2} \cos 2\phi}{a^2} + \frac{\cos 3\phi}{a^3} + \frac{3 \cos 5\phi}{a^5} - \frac{45 \cos 7\phi}{a^7} \right) (\Omega / \text{km})$$

$$\Delta x = \frac{4\omega \times 10^{-4}}{\sqrt{2}} \left(\frac{\cos \phi}{a} - \frac{\cos 3\phi}{a^3} + \frac{3 \cos 5\phi}{a^5} - \frac{45 \cos 7\phi}{a^7} \right) (\Omega / \text{km})$$

Cálculo de Parâmetros

- Cálculo da capacitância shunt:
 - Considerando que: $\sum_i q_i = 0$
 - As tensões nos conds. em relação à terra são:

$$v_a = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(q_a \ln \frac{H_{11}}{D_r} + q_b \ln \frac{H_{12}}{D_{12}} + q_c \ln \frac{H_{31}}{D_{31}} + q_{cg} \ln \frac{H_{1cg}}{D_{1cg}} \right) V$$

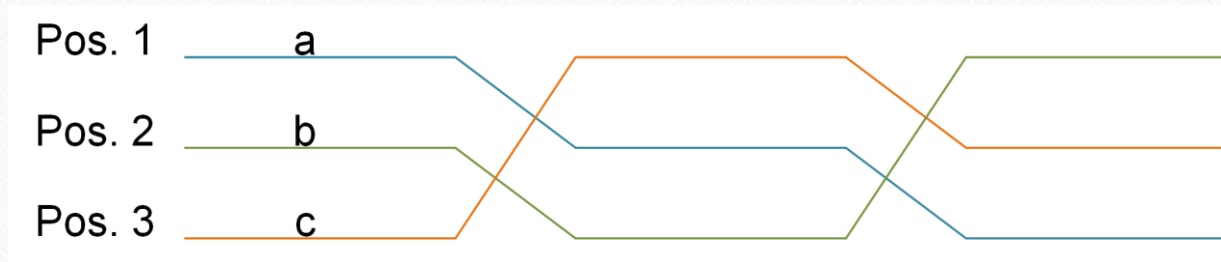
$$v_b = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(q_a \ln \frac{H_{12}}{D_{12}} + q_b \ln \frac{H_{22}}{D_r} + q_c \ln \frac{H_{23}}{D_{23}} + q_{cg} \ln \frac{H_{2cg}}{D_{2cg}} \right) V$$

$$v_c = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(q_a \ln \frac{H_{31}}{D_{31}} + q_b \ln \frac{H_{23}}{D_{23}} + q_c \ln \frac{H_{33}}{D_r} + q_{cg} \ln \frac{H_{3cg}}{D_{3cg}} \right) V$$

$$v_{cg} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(q_a \ln \frac{H_{1cg}}{D_{1cg}} + q_b \ln \frac{H_{2cg}}{D_{2cg}} + q_c \ln \frac{H_{3cg}}{D_{3cg}} + q_{cg} \ln \frac{H_{cgcg}}{D_{rcg}} \right) V$$

Cálculo de Parâmetros

- Considerando a LT transposta:



- Considerando as tensões na fase a:

$$v_{a1} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(q_a \ln \frac{H_{11}}{D_r} + q_b \ln \frac{H_{12}}{D_{12}} + q_c \ln \frac{H_{31}}{D_{31}} + q_{cg} \ln \frac{H_{1cg}}{D_{1cg}} \right) V$$

$$v_{a2} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(q_a \ln \frac{H_{22}}{D_r} + q_b \ln \frac{H_{23}}{D_{23}} + q_c \ln \frac{H_{13}}{D_{13}} + q_{cg} \ln \frac{H_{2cg}}{D_{2cg}} \right) V$$

$$v_{a3} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(q_a \ln \frac{H_{33}}{D_r} + q_b \ln \frac{H_{31}}{D_{31}} + q_c \ln \frac{H_{23}}{D_{23}} + q_{cg} \ln \frac{H_{3cg}}{D_{3cg}} \right) V$$

Cálculo de Parâmetros

- Determina-se a tensão média da fase a:

$$V_a = \frac{V_{a1} + V_{a2} + V_{a3}}{3}$$

$$V_a = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(q_a \ln \frac{\sqrt[3]{H_{11}H_{22}H_{33}}}{D_r} + q_b \ln \frac{\sqrt[3]{H_{12}H_{23}H_{31}}}{\sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}}} + q_c \ln \frac{\sqrt[3]{H_{12}H_{23}H_{31}}}{\sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}}} + q_{cg} \ln \frac{\sqrt[3]{H_{1cg}H_{2cg}H_{3cg}}}{\sqrt[3]{D_{1cg}D_{2cg}D_{3cg}}} \right) V$$

- Para as demais fases e o cabo-guarda:

$$V_b = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(q_a \ln \frac{\sqrt[3]{H_{12}H_{23}H_{31}}}{\sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}}} + q_b \ln \frac{\sqrt[3]{H_{11}H_{22}H_{33}}}{D_r} + q_c \ln \frac{\sqrt[3]{H_{12}H_{23}H_{31}}}{\sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}}} + q_{cg} \ln \frac{\sqrt[3]{H_{1cg}H_{2cg}H_{3cg}}}{\sqrt[3]{D_{1cg}D_{2cg}D_{3cg}}} \right) V$$

$$V_c = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(q_a \ln \frac{\sqrt[3]{H_{12}H_{23}H_{31}}}{\sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}}} + q_b \ln \frac{\sqrt[3]{H_{12}H_{23}H_{31}}}{\sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}}} + q_c \ln \frac{\sqrt[3]{H_{11}H_{22}H_{33}}}{D_r} + q_{cg} \ln \frac{\sqrt[3]{H_{1cg}H_{2cg}H_{3cg}}}{\sqrt[3]{D_{1cg}D_{2cg}D_{3cg}}} \right) V$$

$$V_{cg} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(q_a \ln \frac{\sqrt[3]{H_{1cg}H_{2cg}H_{3cg}}}{\sqrt[3]{D_{1cg}D_{2cg}D_{3cg}}} + q_b \ln \frac{\sqrt[3]{H_{1cg}H_{2cg}H_{3cg}}}{\sqrt[3]{D_{1cg}D_{2cg}D_{3cg}}} + q_c \ln \frac{\sqrt[3]{H_{1cg}H_{2cg}H_{3cg}}}{\sqrt[3]{D_{1cg}D_{2cg}D_{3cg}}} + q_{cg} \ln \frac{H_{cgcg}}{D_{rcg}} \right) V$$

Cálculo de Parâmetros

- Escrevendo na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_{cg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{aa} & P_{ab} & P_{ac} & P_{acg} \\ P_{ba} & P_{bb} & P_{bc} & P_{bcg} \\ P_{ca} & P_{cb} & P_{cc} & P_{ccg} \\ P_{cga} & P_{cgb} & P_{cgc} & P_{cgcg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \\ q_{cg} \end{bmatrix}$$

- A matriz P é a matriz de coeficientes de potenciais Maxwell.
- Considerando o cabo-guarda aterrado através das torres: $V_{cg} = 0$
- Pode-se utilizar a redução da Kron para eliminar o cabo-guarda da equação, da mesma forma como no caso da impedância série.

Cálculo de Parâmetros

- Aplicada a redução de Kron e considerando o fato de os condutores de fase serem idênticos e a LT transposta e invertendo-se a matriz dos potenciais de Maxwell.

$$\begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_p & c_m & c_m \\ c_m & c_p & c_m \\ c_m & c_m & c_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \text{ C/m}$$

- Onde:

c_p = Capacitância total da fase a para o potencial zero de referência (terra).

c_m = Negativo da capacitância entre condutores de fase.

- Em comp. simétricas:

$$c_0 = c_p + 2c_m \text{ C/m}$$

$$c_1 = c_p - c_m \text{ C/m}$$

Cálculo de Parâmetros

- Resumindo:
 - Impedância série da LT não-transposta:

$$Z_\ell = \begin{bmatrix} r_{aa} & r_{ab} & r_{ac} \\ r_{ba} & r_{bb} & r_{bc} \\ r_{ca} & r_{cb} & r_{cc} \end{bmatrix} + j\omega \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \Omega/\text{m}$$

- Admitância shunt da LT não-transposta:

$$y_\ell = j\omega \begin{bmatrix} C_{aa} & -C_{ab} & -C_{ac} \\ -C_{ba} & C_{bb} & -C_{bc} \\ -C_{ca} & -C_{cb} & C_{cc} \end{bmatrix} \text{s/m}$$

Onde: $C_{aa} = C_{at} + C_{ab} + C_{ac}$

Cálculo de Parâmetros

- Impedância série da LT transposta:

$$z_{\ell} = \begin{bmatrix} r & r_n & r_n \\ r_n & r & r_n \\ r_n & r_n & r \end{bmatrix} + j\omega \begin{bmatrix} L & L_m & L_m \\ L_m & L & L_m \\ L_m & L_m & L \end{bmatrix} \Omega/\text{km}$$

- Admitância shunt da LT transposta:

$$y_{\ell} = j\omega \begin{bmatrix} C & -C_m & -C_m \\ -C_m & C & -C_m \\ -C_m & -C_m & C \end{bmatrix} \text{s/km}$$

Cálculo de Parâmetros

- Em componente simétricas:
 - Impedância série da LT transposta:

$$z_{\ell}^{012} = \begin{bmatrix} r + 3r_n & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \end{bmatrix} + j\omega \begin{bmatrix} L + 2L_m & 0 & 0 \\ 0 & L - L_m & 0 \\ 0 & 0 & L - L_m \end{bmatrix} \Omega/\text{km}$$

- Admitância shunt da LT transposta:

$$y_{\ell}^{012} = j\omega \begin{bmatrix} C - 2C_m & 0 & 0 \\ 0 & C + C_m & 0 \\ 0 & 0 & C + C_m \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} C_t & 0 & 0 \\ 0 & C_t + 3C_m & 0 \\ 0 & 0 & C_t + 3C_m \end{bmatrix} \text{S/km}$$

Onde: $C = C_t + 2C_m$

Cálculo de Parâmetros

- Quando a LT é transposta e as correntes nas fases somam zero, tem-se somente a componente de sequência positiva.

- Para a indutância média por fase:

$$L_1 = L - L_m = L_A = 2 \times 10^{-7} \times \ln \frac{D_{eq}}{D_s} \text{ H/m}$$

- Para a capacitância média por fase:

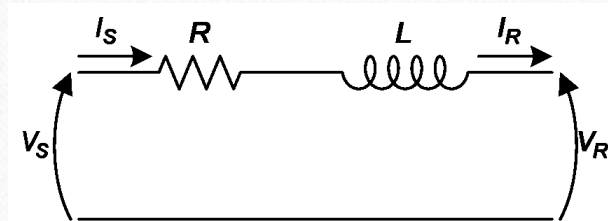
$$C_1 = C_t + 3C_m = C_n = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(D_{eq}/r) - \ln\left(\frac{\sqrt[3]{H_{12}H_{23}H_{31}}}{\sqrt[3]{H_{11}H_{22}H_{33}}}\right)} \text{ F/m}$$

- Onde:

$$D_{eq} = \sqrt[3]{(D_{12}D_{23}D_{31})}$$

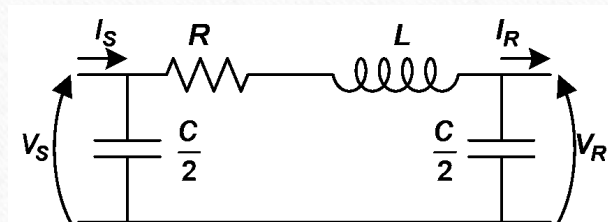
Modelagem de Linhas de Transmissão

- Linhas com transposição
 - Linhas Curtas – parâmetros concentrados: < 80 km
 - Modelo mais simples: usa somente a impedância série multiplicada pelo comprimento da LT.



$$I_S = I_R$$
$$V_S = V_R + I_R Z$$

- Linhas Médias – parâmetros concentrados: entre 80 e 240 km
 - Além da impedância série, leva em consideração a capacitância da LT.

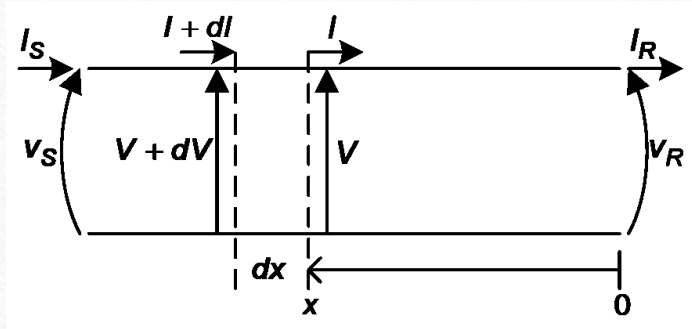


$$I_S = Y \left(1 + \frac{ZY}{4} \right) V_R + \left(\frac{ZY}{2} + 1 \right) I_R$$
$$V_S = \left(\frac{ZY}{2} + 1 \right) V_R + Z I_R$$

Onde: $Z = R + j\omega L$ e $Y = j\omega C$

Modelagem de Linhas de Transmissão

- Linhas longas – parâmetros distribuídos - > 240 km
 - Devem ser considerados os parâmetros distribuídos ao longo da LT.



$$dV = \frac{I + dl + I}{2} z dx = I z dx$$

$$dl = \frac{V + dV + V}{2} y dx = V y dx$$

$$\frac{d^2V}{dx^2} = z \frac{dI}{dx} \quad \text{e} \quad \frac{d^2I}{dx^2} = y \frac{dV}{dx} \quad \longrightarrow \quad \frac{d^2V}{dx^2} = zyV \quad \text{e} \quad \frac{d^2I}{dx^2} = yzI$$

$$\text{Solução das EDs:} \quad V = A_1 e^{\gamma x} + A_2 e^{-\gamma x} \quad \text{e} \quad I = \frac{1}{Z_C} A_1 e^{\gamma x} - \frac{1}{Z_C} A_2 e^{-\gamma x}$$

$$\text{Onde:} \quad \gamma = \sqrt{yz} \quad \text{e} \quad Z_C = \sqrt{z/y}$$

Modelagem de Linhas de Transmissão

- Quando $x=0$:

$$V_R = A_1 + A_2 \quad \text{e} \quad I_R = \frac{1}{Z_C}(A_1 - A_2)$$

- Sendo: $\gamma = \alpha + j\beta$

$$V = \frac{V_R + I_R Z_C}{2} e^{\alpha x} e^{j\beta x} + \frac{V_R - I_R Z_C}{2} e^{-\alpha x} e^{-j\beta x}$$

$$I = \frac{V_R/Z_C + I_R}{2} e^{\alpha x} e^{j\beta x} - \frac{V_R/Z_C - I_R}{2} e^{-\alpha x} e^{-j\beta x}$$

γ : Constante de propagação;

α : Constante de atenuação (nepers);

β : Constante de fase (rad/km).

Modelagem de Linhas de Transmissão

- Interpretação das equações

$e^{\alpha x}$ causa modificação no módulo com x .

$e^{j\beta x}$ causa mudança na fase com x .

- 1º termo de V (onda incidente): aumenta em módulo e avança em fase na direção crescente de x .
- 2º termo de V (onda refletida): diminui em módulo e atrasa em fase na direção crescente de x .
- Considerações similares são feitas para a onda de corrente.
- Linha terminada com Z_C : não há a componente refletida – efeito igual à linha infinita.
- Relações importantes:
 - Comprimento de onda: $\lambda = \frac{2\pi}{\beta}$ km
 - Velocidade de propagação da onda: $v = \lambda f$ km/s

Modelagem de Linhas de Transmissão

- Equações na forma hiperbólica

- Lembrando que:

$$\sinh \theta = \frac{e^{\theta} - e^{-\theta}}{2} \quad \text{e} \quad \cosh \theta = \frac{e^{\theta} + e^{-\theta}}{2}$$

- Então:

$$V = V_R \cosh \gamma x + I_R Z_C \sinh \gamma x = A(x) V_R + B(x) I_R$$

$$I = I_R \cosh \gamma x + \frac{V_R}{Z_C} \sinh \gamma x = C(x) V_R + D(x) I_R$$

- Circuito equivalente (LT de comprimento ℓ)

- Comparando com a linha média:

$$V_S = \left(\frac{Z' Y'}{2} + 1 \right) V_R + Z' I_R$$

$$Z' = Z_C \sinh \gamma \ell = Z_C \frac{\sinh \gamma \ell}{\gamma \ell} \rightarrow \text{Fator de correção}$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{1}{Z_C} \tanh \frac{\gamma \ell}{2} = \frac{Y}{2} \frac{\tanh(\gamma \ell / 2)}{\gamma \ell / 2} \rightarrow \text{Fator de correção}$$

Modelagem de Linhas de Transmissão

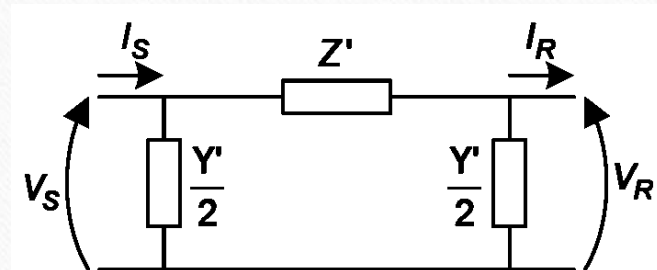
- Relações importantes entre as constantes ABCD (quadripolo):

$$Z' = B$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{A-1}{B}$$

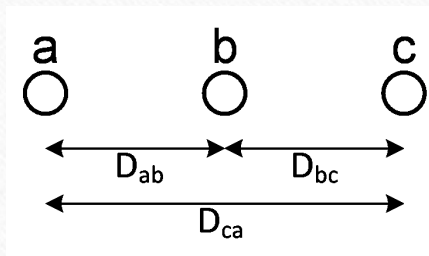
$$AD - BC = 1$$

- Modelo pi-corrigido:



Modelagem de Linhas de Transmissão

- Exemplo: Calcular a tensão e corrente no terminal S, o comprimento e a velocidade de propagação das ondas, e comparar os valores da impedância e admitância com o pi-nominal.
 - Parâmetros da LT:
 - Circuito simples;
 - Transposta;
 - Comprimento: 370 km;
 - Frequência: 60 Hz;
 - Conductor: Rook com espaçamento horizontal de 7,25 m (23,8 ft) entre condutores;
 - Desconsiderar efeito da terra na capacitância;
 - Usar tabelas no cálculo dos parâmetros.



Modelagem de Linhas de Transmissão

- Solução:

- DMG: $D_{eq} = \sqrt[3]{23,8 \times 23,8 \times 47,6} = 30 \text{ ft}$
- Dados dos condutores: Rook.
 - Tipo: ACSR (condutores de alumínio reforçado com aço);
 - Encordoamento: 24 (cond. Alumínio em 2 camadas) e 7 (cond. Aço);
 - Área da seção (alumínio): 636 MCM; Diâmetro externo: 0,977 in;
 - Resistência: DC (20°C): 0,0269 Ω /1000ft; AC (50°C): 0,1603 Ω /mi;
 - RMG (D_g): 0,0327 ft;
 - $X_a = 0,415 \text{ } \Omega$ /mi, $X'_a = 0,0950 \text{ M}\Omega$.mi, $X_d = 0,4127 \text{ } \Omega$ /mi, $X'_d = 0,1009 \text{ M}\Omega$.mi (Dados das tabelas).

$$z = 0,1603 + j(0,415 + 0,4127) = 0,8431 \angle 79,04^\circ \text{ } \Omega/\text{mi}$$

$$y = j(1/(0,0950 + 0,1009)) \times 10^{-6} = 5,105 \times 10^{-6} \angle 90^\circ \text{ S/mi}$$

$$\gamma l = \sqrt{yz}l = 0,0456 + j0,4750 = 0,4772 \angle 84,52^\circ$$

$$Z_C = \sqrt{z/y} = 406,4 \angle -5,48^\circ \text{ } \Omega$$

Modelagem de Linhas de Transmissão

- Solução:

$$V_R = \frac{215\text{kV}}{\sqrt{3}} = 124,13 \angle 0^\circ \text{ kV}$$

$$I_R = \frac{125\text{MW}}{\sqrt{3} \times 215\text{kV}} = 335,7 \angle 0^\circ \text{ A}$$

$$A(230\text{mi}) = 0,8904 \angle 1,34^\circ$$

$$B(230\text{mi}) = Z' = 186,82 \angle 79,45^\circ \Omega$$

$$C(230\text{mi}) = 1,1312 \times 10^{-3} \angle 90,41^\circ \Omega^{-1}$$

$$D(230\text{mi}) = A(230\text{mi})$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{A-1}{B} = 0,000599 \angle 89,82^\circ \text{ S}$$

$$V_S = 137,86 \angle 27,77^\circ \text{ kV}$$

$$I_S = 332,31 \angle 26,33^\circ \text{ A}$$

$$\beta = \frac{0,4750}{230} = 0,002065 \text{ rad/mi}$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = 3043 \text{ mi}$$

$$v = \lambda f = 182580 \text{ mi/s ou } 293834 \text{ km/s}$$

$$Z = z\ell = 193,9 \angle 79,04^\circ \Omega$$

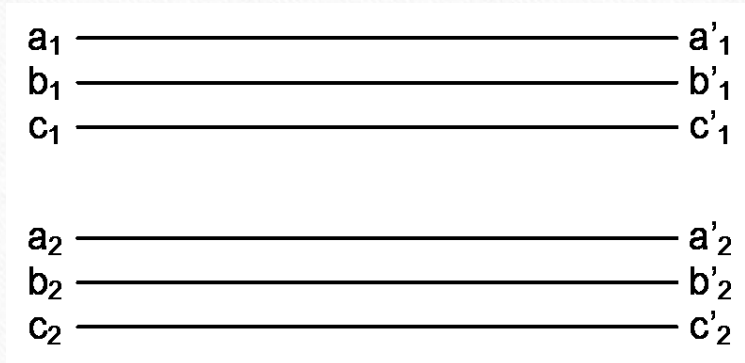
$$\frac{Y}{2} = \frac{y\ell}{2} = 0,000587 \angle 90^\circ \text{ S}$$

$$\text{Erro}_Z = 3,8\%$$

$$\text{Erro}_Y = 2,0\%$$

Modelagem de Linhas de Transmissão

- Linha de transmissão transposta com circuito duplo.



- Escrevendo as equações para as quedas de tensão:

$$\begin{bmatrix} V_{a_1 a'_1} \\ V_{b_1 b'_1} \\ V_{c_1 c'_1} \\ V_{a_2 a'_2} \\ V_{b_2 b'_2} \\ V_{c_2 c'_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{a_1} & Z_{a_1 b_1} & Z_{a_1 c_1} & Z_{a_1 a_2} & Z_{a_1 b_2} & Z_{a_1 c_2} \\ Z_{b_1 a_1} & Z_{b_1} & Z_{b_1 c_1} & Z_{b_1 a_2} & Z_{b_1 b_2} & Z_{b_1 c_2} \\ Z_{c_1 a_1} & Z_{c_1 b_1} & Z_{c_1} & Z_{c_1 a_2} & Z_{c_1 b_2} & Z_{c_1 c_2} \\ Z_{a_2 a_1} & Z_{a_2 b_1} & Z_{a_2 c_1} & Z_{a_2} & Z_{a_2 b_2} & Z_{a_2 c_2} \\ Z_{b_2 a_1} & Z_{b_2 b_1} & Z_{b_2 c_1} & Z_{b_2 a_2} & Z_{b_2} & Z_{b_2 c_2} \\ Z_{c_2 a_1} & Z_{c_2 b_1} & Z_{c_2 c_1} & Z_{c_2 a_2} & Z_{c_2 b_2} & Z_{c_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a_1} \\ I_{b_1} \\ I_{c_1} \\ I_{a_2} \\ I_{b_2} \\ I_{c_2} \end{bmatrix}$$

Modelagem de Linhas de Transmissão

- Como a LT é equilibrada e transposta: as mútuas são iguais:

$$\begin{bmatrix} V_{a_1 a_1'} \\ V_{b_1 b_1'} \\ V_{c_1 c_1'} \\ V_{a_2 a_2'} \\ V_{b_2 b_2'} \\ V_{c_2 c_2'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{a_1} & Z_{m_1} & Z_{m_1} & Z_{a_1 a_2} & Z_{m_{12}} & Z_{m_{12}} \\ Z_{m_1} & Z_{a_1} & Z_{m_1} & Z_{m_{12}} & Z_{a_1 a_2} & Z_{m_{12}} \\ Z_{m_1} & Z_{m_1} & Z_{a_1} & Z_{m_{12}} & Z_{m_{12}} & Z_{a_1 a_2} \\ Z_{a_1 a_2} & Z_{m_{12}} & Z_{m_{12}} & Z_{a_2} & Z_{m_2} & Z_{m_2} \\ Z_{m_{12}} & Z_{a_1 a_2} & Z_{m_{12}} & Z_{m_2} & Z_{a_2} & Z_{m_2} \\ Z_{m_{12}} & Z_{m_{12}} & Z_{a_1 a_2} & Z_{m_2} & Z_{m_2} & Z_{a_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a_1} \\ I_{b_1} \\ I_{c_1} \\ I_{a_2} \\ I_{b_2} \\ I_{c_2} \end{bmatrix}$$

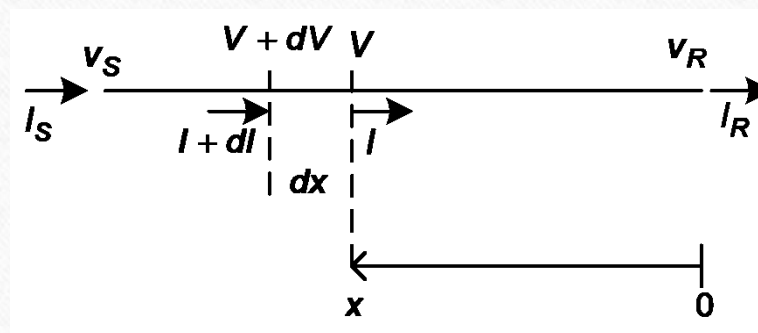
- Devido à transposição: $Z_{a_1 a_2} = Z_{m_{12}}$ e em comp. simétricas:

$$\begin{bmatrix} V_{a_1 a_1}^0 \\ V_{a_1 a_1}^1 \\ V_{a_1 a_1}^2 \\ V_{a_2 a_2}^0 \\ V_{a_2 a_2}^1 \\ V_{a_2 a_2}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{a_1} + 2Z_{m_1} & 0 & 0 & 3Z_{m_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{a_1} - Z_{m_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{a_1} - Z_{m_1} & 0 & 0 & 0 \\ 3Z_{m_{12}} & 0 & 0 & Z_{a_2} + 2Z_{m_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{a_2} - Z_{m_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{a_2} - Z_{m_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a_1}^0 \\ I_{a_1}^1 \\ I_{a_1}^2 \\ I_{a_2}^0 \\ I_{a_2}^1 \\ I_{a_2}^2 \end{bmatrix}$$

Modelagem de Linhas de Transmissão

- **Linhas de transmissão não-transpostas**

- Necessário uso de matrizes e vetores, uma vez que não se tem mais transposições e a LT é desequilibrada.



- Do circuito:

$$\frac{\partial}{\partial x}[I] = [y][V] \quad (1) \quad \text{e} \quad \frac{\partial}{\partial x}[V] = [z][I] \quad (2)$$

- Então:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}[I] = [y] \frac{\partial}{\partial x}[V] \quad (3) \quad \text{e} \quad \frac{\partial^2}{\partial x^2}[V] = [z] \frac{\partial}{\partial x}[I] \quad (4)$$

Modelagem de Linhas de Transmissão

- Desta forma:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}[I] = [y][z][I] \quad (5) \quad \text{e} \quad \frac{\partial^2}{\partial x^2}[V] = [z][y][V] \quad (6)$$

- Escolhendo a primeira equação e expandindo:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{aa} & y_{ab} & y_{ac} \\ y_{ba} & y_{bb} & y_{bc} \\ y_{ca} & y_{cb} & y_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{aa} & p_{ab} & p_{ac} \\ p_{ba} & p_{bb} & p_{bc} \\ p_{ca} & p_{cb} & p_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 I_a}{\partial x^2} = p_{aa}I_a + p_{ab}I_b + p_{ac}I_c$$

$$\frac{\partial^2 I_b}{\partial x^2} = p_{ba}I_a + p_{bb}I_b + p_{bc}I_c \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 I_c}{\partial x^2} = p_{ca}I_a + p_{cb}I_b + p_{cc}I_c$$

Modelagem de Linhas de Transmissão

- Primeira solução das ED's, onde m_i e γ são constantes a determinar:

$$\begin{aligned}I_a &= m_a \sinh(\gamma x) \\I_b &= m_b \sinh(\gamma x) \\I_c &= m_c \sinh(\gamma x)\end{aligned}\quad (9)$$

- Substituindo (9) em (8):

$$\begin{aligned}(\rho_{aa} - \gamma^2)m_a + \rho_{ab}m_b + \rho_{ac}m_c &= 0 \\ \rho_{ba}m_a + (\rho_{bb} - \gamma^2)m_b + \rho_{bc}m_c &= 0 \\ \rho_{ca}m_a + \rho_{cb}m_b + (\rho_{cc} - \gamma^2)m_c &= 0\end{aligned}\quad (10)$$

- Para uma solução não-trivial, o determinante deve ser igual a zero:

$$\begin{vmatrix}(\rho_{aa} - \gamma^2) & \rho_{ab} & \rho_{ac} \\ \rho_{ba} & (\rho_{bb} - \gamma^2) & \rho_{bc} \\ \rho_{ca} & \rho_{cb} & (\rho_{cc} - \gamma^2)\end{vmatrix} = 0 \quad (11)$$

Modelagem de Linhas de Transmissão

- Solução do determinante (equação cúbica em γ^2):

$$(\gamma^2)^3 + A(\gamma^2)^2 + B(\gamma^2) + C = 0$$

- Onde:

$$A = -(p_{11} + p_{22} + p_{33})$$

$$B = p_{11}p_{22} + p_{11}p_{33} + p_{22}p_{33} - p_{13}p_{31} - p_{23}p_{32} - p_{12}p_{21}$$

$$C = -(p_{11}p_{22}p_{33} + p_{12}p_{23}p_{31} + p_{21}p_{13}p_{32} - p_{11}p_{23}p_{32} - p_{22}p_{31}p_{13} - p_{33}p_{12}p_{21})$$

- As raízes obtidas γ_a^2 , γ_b^2 , γ_c^2 , são as autovalores da matriz P.
- Devem-se encontrar os autovetores relacionados aos autovalores obtidos:
 - Na equação 10, fazendo:

$$m_a = 1 \text{ e } \gamma = \gamma_a \text{ obtém-se: } m_{ba} \text{ e } m_{ca}$$

$$m_b = 1 \text{ e } \gamma = \gamma_b \text{ obtém-se: } m_{ab} \text{ e } m_{cb}$$

$$m_c = 1 \text{ e } \gamma = \gamma_c \text{ obtém-se: } m_{ac} \text{ e } m_{bc}$$

Modelagem de Linhas de Transmissão

- Os autovetores são:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ m_{ba} \\ m_{ca} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} m_{ab} \\ 1 \\ m_{cb} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} m_{ac} \\ m_{bc} \\ 1 \end{bmatrix}$$

- Segunda solução das EDs:

$$\begin{aligned} I_a &= m_a \cosh(\gamma x) \\ I_b &= m_b \cosh(\gamma x) \\ I_c &= m_c \cosh(\gamma x) \end{aligned} \quad (12)$$

- As constantes utilizadas foram as mesmas da primeira solução e, desta forma, os autovalores e autovetores obtidos são os mesmos da primeira solução.
- Pode-se escrever a solução geral das EDs em termos das constantes arbitrárias:

$$k_a, k_b, k_c \text{ e } n_a, n_b, n_c$$

Modelagem de Linhas de Transmissão

- Então:

$$\begin{aligned}
 I_a &= k_a \sinh(\gamma_a x) + m_{ab} k_b \sinh(\gamma_b x) + m_{ac} k_c \sinh(\gamma_c x) + n_a \cosh(\gamma_a x) + m_{ab} n_b \cosh(\gamma_b x) + m_{ac} n_c \cosh(\gamma_c x) \\
 I_b &= m_{ba} k_a \sinh(\gamma_a x) + k_b \sinh(\gamma_b x) + m_{bc} k_c \sinh(\gamma_c x) + m_{ba} n_a \cosh(\gamma_a x) + n_b \cosh(\gamma_b x) + m_{bc} n_c \cosh(\gamma_c x) \\
 I_c &= m_{ca} k_a \sinh(\gamma_a x) + m_{cb} k_b \sinh(\gamma_b x) + k_c \sinh(\gamma_c x) + m_{ca} n_a \cosh(\gamma_a x) + m_{cb} n_b \cosh(\gamma_b x) + n_c \cosh(\gamma_c x)
 \end{aligned} \quad (13)$$

- Na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & m_{ab} & m_{ac} \\ m_{ba} & 1 & m_{bc} \\ m_{ca} & m_{cb} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_a \sinh(\gamma_a x) \\ k_b \sinh(\gamma_b x) \\ k_c \sinh(\gamma_c x) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & m_{ab} & m_{ac} \\ m_{ba} & 1 & m_{bc} \\ m_{ca} & m_{cb} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_a \cosh(\gamma_a x) \\ n_b \cosh(\gamma_b x) \\ n_c \cosh(\gamma_c x) \end{bmatrix} \quad (14)$$

- Fatorando:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} \sinh(\gamma_a x) & 0 & 0 \\ 0 & \sinh(\gamma_b x) & 0 \\ 0 & 0 & \sinh(\gamma_c x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_a \\ k_b \\ k_c \end{bmatrix} + M \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_a x) & 0 & 0 \\ 0 & \cosh(\gamma_b x) & 0 \\ 0 & 0 & \cosh(\gamma_c x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_a \\ n_b \\ n_c \end{bmatrix} \quad (15)$$

Modelagem de Linhas de Transmissão

- Escrevendo numa forma compacta:

$$[I] = [M][\sinh(\gamma_i x)]_d [k] + [M][\cosh(\gamma_i x)]_d [n] \quad (16)$$

- Substituindo (16) em (1):

$$[v] = [y]^{-1} [M][\gamma_i \cosh(\gamma_i x)]_d [k] + [y]^{-1} [M][\gamma_i \sinh(\gamma_i x)]_d [n] \quad (17)$$

- Cálculo das constantes arbitrárias $[k]$ e $[n]$

- Usar condições iniciais:

$$\text{Em } x = 0: [I] = [I^R] \text{ e } [V] = [V^R]$$

- Utilizando (16):

$$[I^R] = [M][n] \longrightarrow [n] = [M]^{-1} [I^R] \quad (18)$$

- Utilizando (17):

$$[V^R] = [y]^{-1} [M][\gamma_i]_d [k] \longrightarrow [k] = [\gamma_i]_d^{-1} [M]^{-1} [y] [V^R] \quad (19)$$

$[\cdot]_d$: Matriz diagonal.

Modelagem de Linhas de Transmissão

- Solução completa:

$$[v] = [y]^{-1} [M] [\cosh(\gamma_i x)]_d [M]^{-1} [y] [v^R] + [y]^{-1} [M] [\gamma_i \sinh(\gamma_i x)]_d [M]^{-1} [I^R] \quad (20)$$

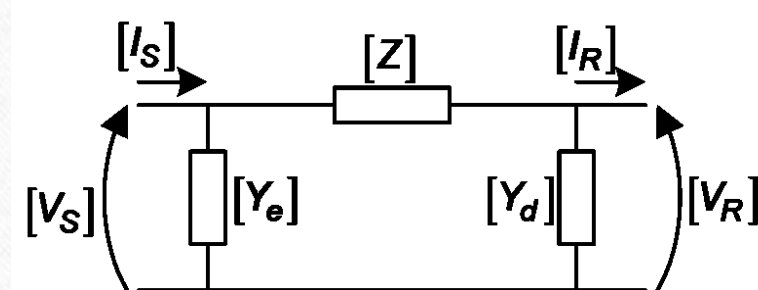
$$[I] = [M] \left[\frac{\sinh(\gamma_i x)}{\gamma_i} \right]_d [M]^{-1} [y] [v^R] + [M] [\cosh(\gamma_i x)]_d [M]^{-1} [I^R] \quad (21)$$

- Constantes ABCD:

$$\begin{aligned} [A] &= [y]^{-1} [M] [\cosh(\gamma_i x)]_d [M]^{-1} [y] \\ [B] &= [y]^{-1} [M] [\gamma_i \sinh(\gamma_i x)]_d [M]^{-1} \\ [C] &= x [M] \left[\frac{\sinh(\gamma_i x)}{\gamma_i x} \right]_d [M]^{-1} [y] \\ [D] &= [M] [\cosh(\gamma_i x)]_d [M]^{-1} \end{aligned} \quad (22)$$

Modelagem de Linhas de Transmissão

- Circuito equivalente (quadripolo):



- Equacionando:

$$[V_s] = \{[Id] + [Z][Y_d]\}[V_R] + [Z][I_R] \quad (23)$$

$$[I_s] = \{[Y_d] + [Y_e] + [Y_e][Z][Y_d]\}[V_R] + \{[Id] + [Y_e][Z]\}[I_R] \quad (24)$$

- Comparando com as equações (20) e (21):

$$\begin{aligned} [Z] &= [B] \\ [Y_e] &= \{[D] - [Id]\}[B]^{-1} \\ [Y_d] &= [B]^{-1}\{[A] - [Id]\} \end{aligned} \quad (25)$$

$[Id]$: Matriz identidade.

Modelagem de Linhas de Transmissão

- Exemplo: Calcular os parâmetros da LT a seguir e comparar com os valores obtidos no ATP para seq. positiva e zero.
 - Parâmetros da LT:
 - Circuito simples;
 - Transposta;
 - Frequência: 60 Hz;
 - Condutor: Linnet;
 - Dois condutores por fase.
 - Dados da torre:

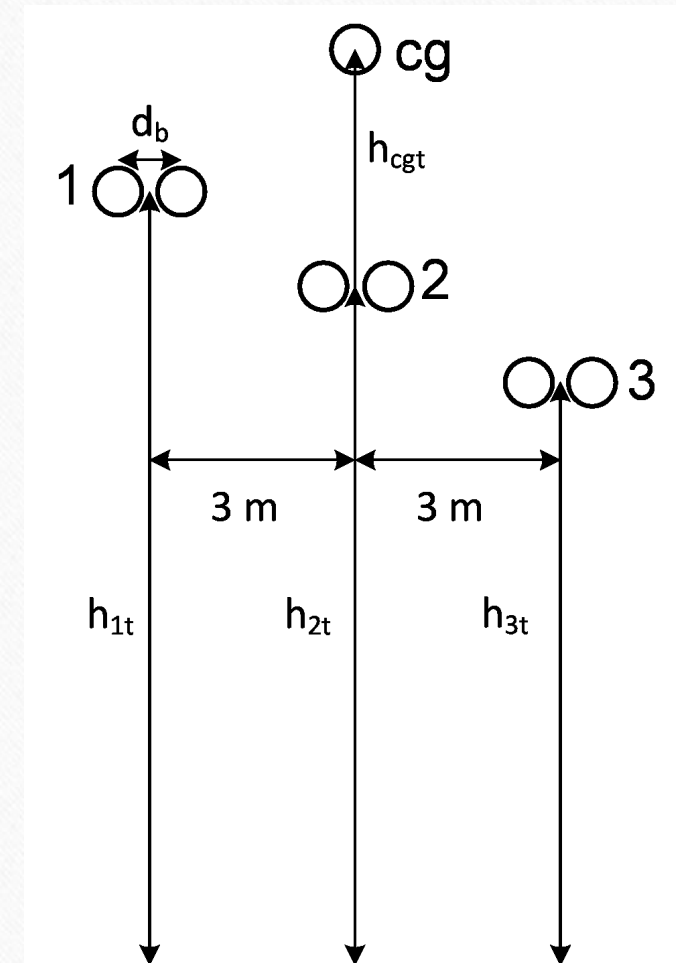
$$h_{1t} = 21,8 \text{ m}, h_{2t} = 19,9 \text{ m}, h_{3t} = 18 \text{ m}, h_{cgt} = 26,8 \text{ m}$$

$$h_{1vao} = 14,07 \text{ m}, h_{2vao} = 12,17 \text{ m}, h_{3vao} = 10,27 \text{ m}, h_{cgvao} = 19,84 \text{ m}$$

$$h = \frac{1}{3} h_t + \frac{2}{3} h_{vao}$$

$$h_1 = 16,647 \text{ m}, h_2 = 14,747 \text{ m}, h_3 = 12,847 \text{ m}, h_{cg} = 22,160 \text{ m}$$

$$d_1 = -3 \text{ m}, d_2 = 0 \text{ m}, d_3 = 3 \text{ m}, d_{cg} = 0 \text{ m}$$



Modelagem de Linhas de Transmissão

- Dados dos condutores: Linnet.
 - Tipo: ACSR (condutores de alumínio reforçado com aço);
 - Encordoamento: 26 (cond. Alumínio em 2 camadas) e 7 (cond. Aço);
 - Área da seção (alumínio): 336,4 MCM; Diâmetro externo: 1,83134 cm;
 - Resistência: DC (20°C): 0,0507 Ω /1000ft; AC (50°C): 0,186784 Ω /km;
 - RMG (D_s): 0,740664 cm.
- Dados do cabo-guarda:
 - R_{cc} (50°C) = 4,0389 Ω ;
 - $R_{ac} \approx 1,5\% * R_{cc} + R_{cc} = 4,0982$ Ω /km
 - RMG (D_{scg}) = 0,47625 cm.

Modelagem de Linhas de Transmissão

- Solução:

- RMG do bundle: $D_{sb} = \sqrt{D_s \times d} = \sqrt{0,00741 \times 0,4} = 0,05443$ m (Cálculo da indutância)

- Raio para cálculo da capacitância:

$$raioext = \frac{1,83134}{2} = 0,0091567 \text{ m}$$

- Para o bundle: $D_{sc} = \sqrt{raioext \times d} = \sqrt{0,0091567 \times 0,40} = 0,06052$ m

- Distância entre os condutores e suas próprias imagens:

$$H_1 = 33,2933 \text{ m}; H_2 = 29,4933 \text{ m}; H_3 = 25,6933 \text{ m}; H_{cg} = 44,32 \text{ m}$$

- Distância entre os condutores e as imagens de outros condutores:

$$H_{12} = H_{21} = 31,5364 \text{ m}; H_{23} = H_{32} = 27,7559 \text{ m}; H_{31} = H_{13} = 30,9067 \text{ m};$$

$$H_{1cg} = H_{cg1} = 38,9224 \text{ m}; H_{2cg} = H_{cg2} = 36,9067 \text{ m}; H_{3cg} = H_{cg3} = 35,1350 \text{ m};$$

- Distância entre os condutores:

$$D_{12} = D_{21} = 3,5511 \text{ m}; D_{23} = D_{32} = 3,5511 \text{ m}; D_{31} = D_{13} = 7,1021 \text{ m};$$

$$D_{1cg} = D_{cg1} = 6,2767 \text{ m}; D_{2cg} = D_{cg2} = 7,4133 \text{ m}; D_{3cg} = D_{cg3} = 9,7846 \text{ m};$$

Modelagem de Linhas de Transmissão

- Cálculo da impedância série (LT transposta):

- Indutância:

$$L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{\sqrt[3]{H_1 H_2 H_3}}{D_{sb}} = 1,25788 \times 10^{-6} \text{ H/m}$$

$$L_{ab} = L_{bc} = L_{ca} = 2 \times 10^{-7} \ln \sqrt[3]{\frac{H_{12} H_{23} H_{31}}{D_{12} D_{23} D_{31}}} = 0,37894 \times 10^{-6} \text{ H/m}$$

$$L_{acg} = L_{bcg} = L_{ccg} = 2 \times 10^{-7} \ln \sqrt[3]{\frac{H_{1cg} H_{2cg} H_{3cg}}{D_{1cg} D_{2cg} D_{3cg}}} = 0,31388 \times 10^{-6} \text{ H/m}$$

$$L_{cgcg} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{H_{cg}}{D_{scg}} = 1,82768 \times 10^{-6} \text{ H/m}$$

- Resistência:

- Cond. de fase: $r_{bd} = \frac{r_{ac}}{2} = 2,0491 \times 10^{-3} \text{ } \Omega/\text{m}$

- Cabo-guarda: $r_{cg} = 0,40982 \times 10^{-4} \text{ } \Omega/\text{m}$

Modelagem de Linhas de Transmissão

- Após redução de Kron:

$$z_p = 0,09671 + 0,47365i \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$z_m = 0,00332 + 0,14230i \text{ } \Omega/\text{km}$$

- Passando para valores sequenciais:

$$z_0 = 0,10336 + 0,75825i \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$z_1 = 0,09339 + 0,33135i \text{ } \Omega/\text{km}$$

- Cálculo da admitância shunt:

$$P_{aa} = P_{bb} = P_{cc} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{\sqrt[3]{H_1 H_2 H_3}}{D_{sc}} = 1,11147 \times 10^{11} \text{ m/F}$$

$$P_{ab} = P_{bc} = P_{ca} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \sqrt[3]{\frac{H_{12} H_{23} H_{31}}{D_{12} D_{23} D_{31}}} = 0,34058 \times 10^{11} \text{ m/F}$$

$$P_{acg} = P_{bcg} = P_{ccg} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \sqrt[3]{\frac{H_{1cg} H_{2cg} H_{3cg}}{D_{1cg} D_{2cg} D_{3cg}}} = 0,28210 \times 10^{11} \text{ m/F}$$

$$P_{cgcg} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{H_{cg}}{D_{scg}} = 1,64264 \times 10^{11} \text{ m/F}$$

Modelagem de Linhas de Transmissão

- Após redução de Kron e inversão da matriz P:

$$y_p = 4,0231 \times 10^{-6} i \text{ S/km}$$

$$y_m = -0,8673 \times 10^{-6} i \text{ S/km}$$

- Passando para valores sequenciais:

$$y_0 = 2,2886 \times 10^{-6} i \text{ S/km}$$

$$y_1 = 4,8903 \times 10^{-6} i \text{ S/km}$$

Modelagem no ATP

- Dados necessários para cálculo dos parâmetros de uma LT usando o ATP.

Código	Seção			n° de fios x diâmetro		Diâmetro		Massa aproximada		
	Alumínio		Total	Alumínio	Aço	Alma	Condutor	Alumínio	Aço	Total
	(AWG) ou (kcmil)	(mm²)	(mm²)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/km)	(kg/km)	(kg/km)
Ostrich	300,0	152,19	176,70	26 x 2,73	7 x 2,12	6,36	17,27	420,2	193,2	613,4
Merlin	336,4	170,22	179,89	18 x 3,47	1 x 3,47	3,47	17,36	468,8	73,7	542,5
Linnet	336,4	170,55	198,03	26 x 2,89	7 x 2,25	6,75	18,29	470,9	216,4	687,3
Oriole	336,4	170,50	210,28	30 x 2,69	7 x 2,69	8,07	18,83	471,1	311,0	782,1

Fonte: FICAP

- Linha transposta com circuito duplo:

```

C LT 138kV - Linnet - 50km - Resist. solo = 600 ohm.m
LINE CONSTANTS
BRANCH IN__AOUT__AIN__BOUT__BIN__COUT__C
METRIC
C geometria e dados de condutores
C      ohm/km      cm      m      m      m      cm graus
C F<skin<ResCC >><X<Reat >><Dext >><X horz><Y torr><Y mvao><ebund ><alfa> <n
10.316 0.18645 4      1.8314      -3.      21.8      14.07      40.      0.0      2
20.316 0.18645 4      1.8314      0.0      19.9      12.17      40.      0.0      2
30.316 0.18645 4      1.8314      3.      18.      10.27      40.      0.0      2
0 0.5 4.0389 4      0.9525      0.0      26.8      19.84      0.0      0.0      0
BLANK CONDUTORES
C DADOS GERAIS      inv      inv
C ohm.m      Hz      CCCCCC ZZZZZZ C (km)
C ROsolo<freq >><Fcar > es es es es ^<compr >      nT
600.0      60.      0.      11 11      50.      0
BLANK DADOS GERAIS
$PUNCH
BLANK LINE CONSTANTS
    
```


Modelagem da LT no ATP

- F: Número da fase (1,2,3...n). Utilizar 0 para o cabo-guarda.
- <SKIN: Efeito pelicular.
 - 0.0: não considera;
 - 0.5: Condutor sólido;
 - T/D: Condutor tubular. Espessura/Diâmetro externo;
- <ResCC >: resistência CC do condutor (Ω/km);
- <X: flag da auto indutância (normalmente se usa o valor 4, indicando que será utilizado correção nos parâmetros devido ao efeito pelicular.)
- <Reat >: em branco quando <X é 4;
- <Dext >: diâmetro externo do condutor tubular (cm);
- <X horz>: Distância horizontal do centro do condutor à alguma referência (usar o centro da torre) (m);
- <Y torr>: Distância vertical do centro do condutor em relação ao solo (m);
- <Y mvao>: Distância vertical do centro do condutor em relação ao solo no vão entre torres;
- <ebund >: espaço entre os centros de condutores adjacentes pertencentes à um mesmo bundle (cm);
- <alfa>: ângulo dos condutores em relação à uma reta horizontal no centro do bundle (graus);
- <n: número de condutores que formam o bundle.
- Obs: No caso de serem informados ambos <Y torr> e <Y mvao> será utilizada uma média para a altura dos condutores, sendo a média calculada da seguinte forma: $Y = 1/3\langle Y \text{ torr} \rangle + 2/3\langle Y \text{ mvao} \rangle$

Modelagem da LT no ATP

- Dados Gerais
 - ROsolo: Resistividade do solo (Ωm);
 - <freq >: Frequência da rede;
 - <Fcar >: flag, controla o número de termos de correção na equação de Carson da impedância de retorno pela de terra. (0: sem correção, 1: com correção -> alta precisão);
 - CCCCCC: Impressão da matriz de capacitância.
 - Se $\omega=0$ ou vazio (se igual a 1, os valores são divididos por ω)
 - 100000: inversa de Y_c (cada condutor tem uma linha e uma coluna na matriz, incluindo os cabos-guarda);
 - 010000: inversa de Y_{ce} (sist. de cond. equivalentes em seq. de fase, eliminação dos cabos-guarda e bundles);
 - 001000: inversa de Y_{cs} (sist. de cond. equivalentes em comp. sim., eliminação dos cabos-guarda e bundles);
 - 000100: Y_c ;
 - 000010: Y_{ce} ;
 - 000001: Y_{cs} .
 - ZZZZZZ: Impressão da matriz de impedância série (mesma consideração anterior, a menos da divisão por ω).
 - <compr >: Comprimento da LT (opcional, os dados são calculados em por unid. de comp.);
 - nT: 0, transposta. 1, não-transposta.

Modelagem da LT no ATP

- Comparação com ATP (arquivo .lis):

Seq.	Resistance ohm/km	Reactance ohm/km	Susceptance mho/km
Zero:	1.03532E-01	7.57629E-01	2.29466E-06
Positiva:	9.35518E-02	3.30563E-01	4.96285E-06

$$z_0 = 1,0336 \times 10^{-1} + 7,5825 \times 10^{-1} i \text{ } \Omega/\text{km}$$

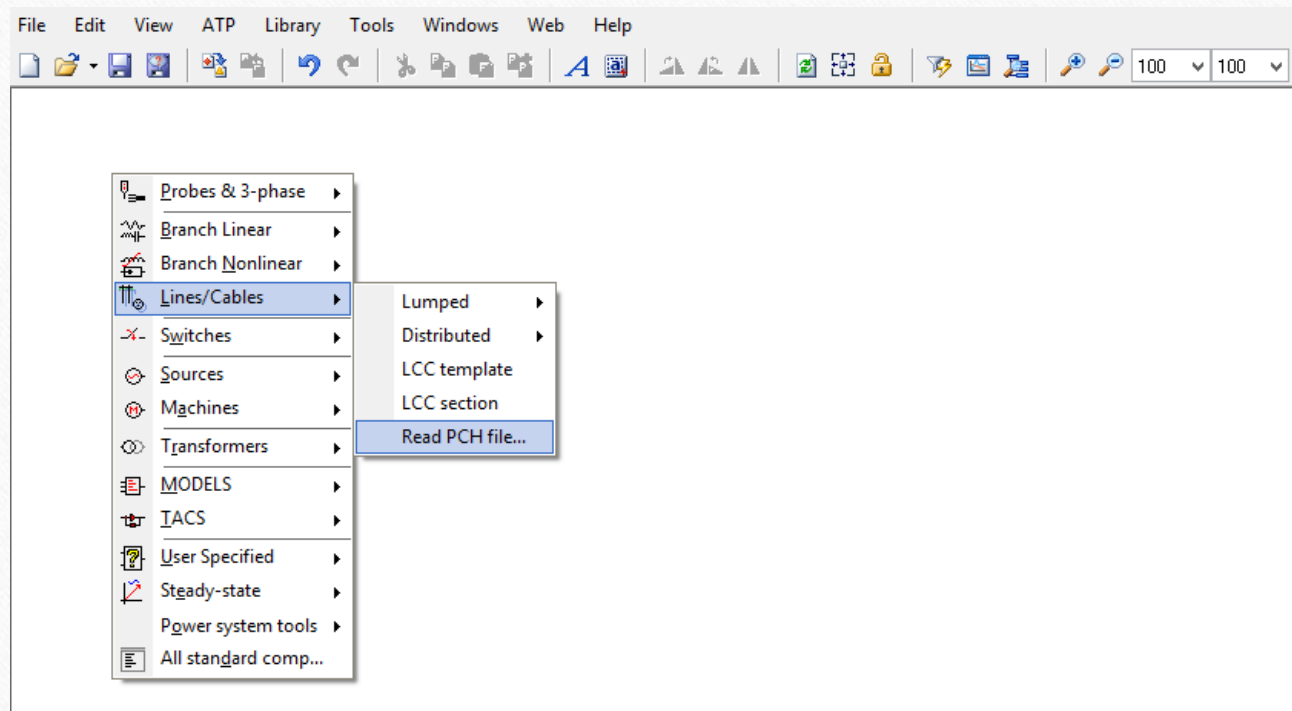
$$z_1 = 9,339 \times 10^{-2} + 3,3135 \times 10^{-1} i \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$y_0 = 2,2886 \times 10^{-6} i \text{ mho/km}$$

$$y_1 = 4,8903 \times 10^{-6} i \text{ mho/km}$$

Modelagem da LT no ATP

- Arquivo de saída após processamento pelo ATP:
 - **It138_linnet_3-8_sematpdraw.lis**: arquivo com os resultados do processamento pelo ATP, onde constam os valores dos parâmetros da linha.
 - **It138_linnet_3-8_sematpdraw.pch**: arquivo utilizado no atpdraw para gerar o arquivo .lib, o qual é o modelo da linha que será usado pelo ATP.



Modelagem da LT no ATP

- Após clicar em Read PCH file será pedido ao usuário o local do arquivo e então será gerado o arquivo .lib.

Comp. da LT

Nome do arquivo .lib

File Edit View ATP Library Tools Windows Web Help

User specified: LCC_L3

DATA	UNIT	VALUE
length		100

NODE	PHASE	NAME
IN1	ABC	X0001
OUT1	ABC	X0002

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment: Clarke

User specified

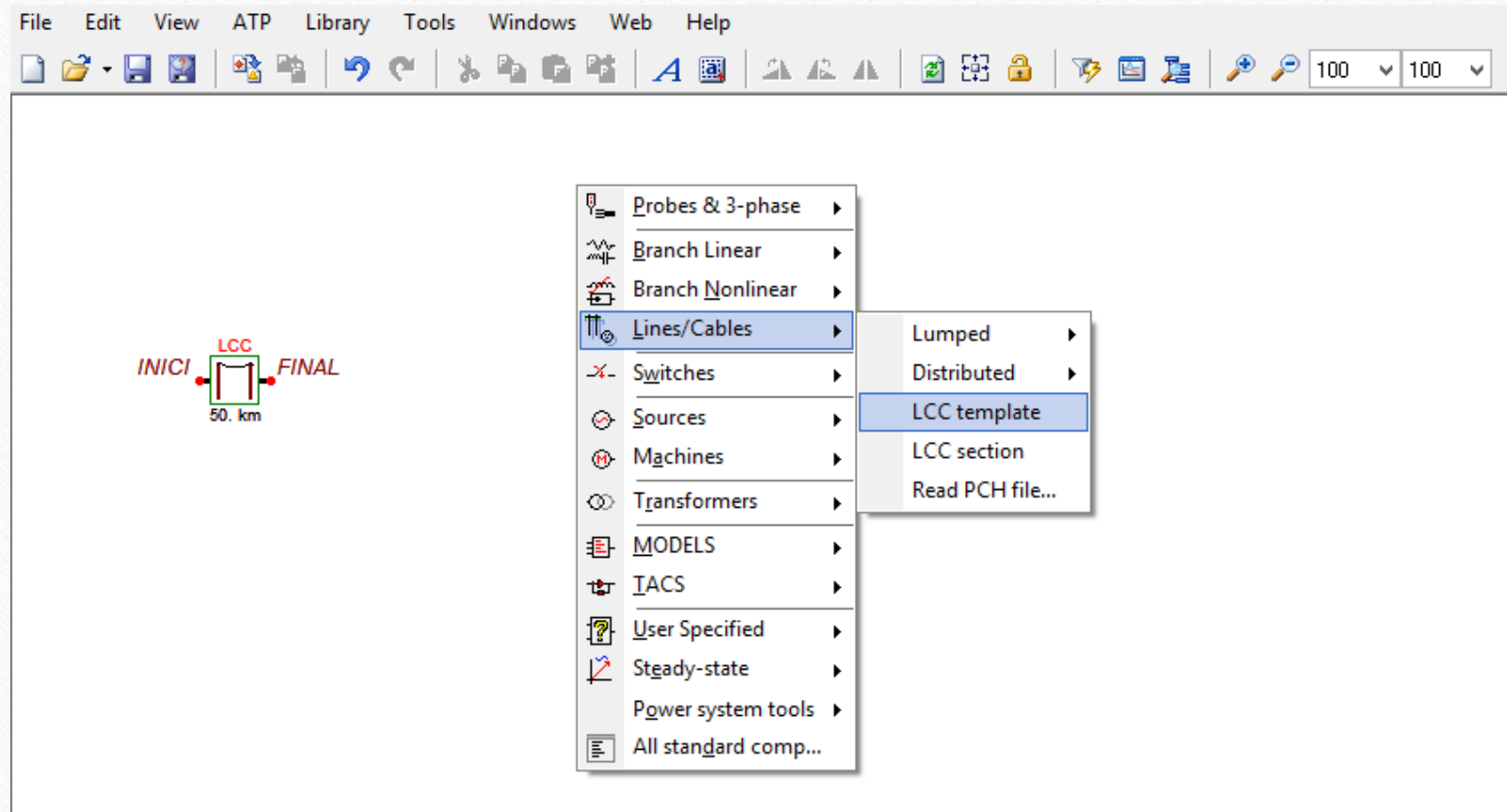
\$include: l138_linnnet_3-8_sematp Edit... Send parameters Hide Protect

Empty Internal phase seq.

Edit definitions OK Cancel Help

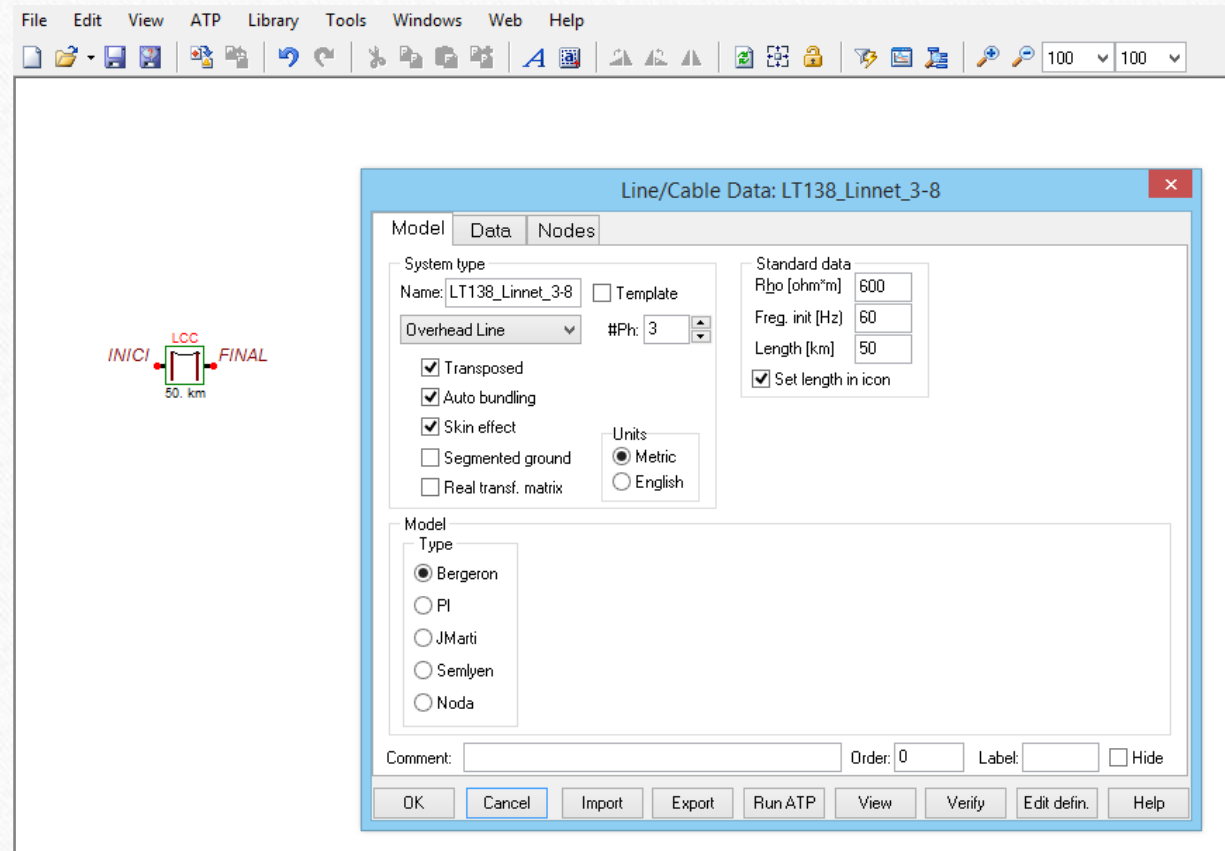
Modelagem da LT no ATP

- Definição da LT utilizando o componente LCC template:



Modelagem da LT no ATP

- Entrar com dados da linha:
 - Primeiros dados: LT 138 kV trifásica; Transposta; Condutor tipo Linnet; resist. do solo 600 Ω .m; Freq. 60 Hz; Comp. 50 km. Para cálculo padrão usar o tipo de modelo Bergeron (modelos K.C. Lee – LT não-transposta e Clarke – LT transposta).



Modelagem da LT no ATP

- Dados da linha (continuação):

Código	Seção			n° de fios x diâmetro		Diâmetro		Massa aproximada		
	Alumínio		Total	Alumínio	Aço	Alma	Condutor	Alumínio	Aço	Total
	(AWG) ou (kcmil)	(mm²)	(mm²)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/km)	(kg/km)	(kg/km)
Ostrich	300,0	152,19	176,70	26 x 2,73	7 x 2,12	6,36	17,27	420,2	193,2	613,4
Merlin	336,4	170,22	179,89	18 x 3,47	1 x 3,47	3,47	17,36	468,8	73,7	542,5
Linnet	336,4	170,55	198,03	26 x 2,89	7 x 2,25	6,75	18,29	470,9	216,4	687,3
Oriole	336,4	170,50	210,28	30 x 2,69	7 x 2,69	8,07	18,83	471,1	311,0	782,1

Fonte: FICAP



Cabo-guarda:

- 3,8" de aço;
- $R_{cc} = 4,0389 \Omega$;
- $D_{ex} = 0,9525$;
- $N^{\circ} \text{ cond.} = 7$;



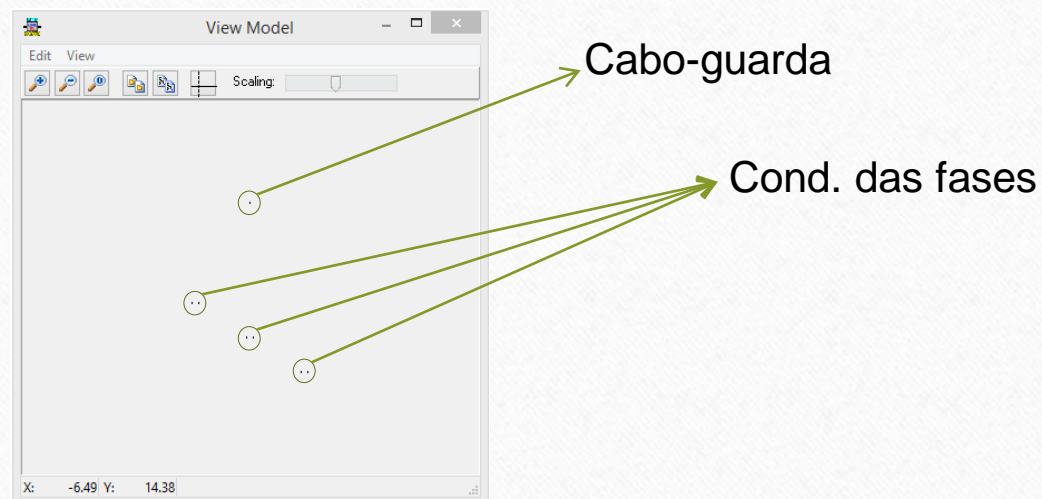
Line/Cable Data: LT138_Linnet_3-8

Model	Data	Nodes								
#	Ph.no.	Rin	Rout	Resis	Horiz	Vtower	Vmid	Separ	Alpha	NB
		[cm]	[cm]	[ohm/km DC]	[m]	[m]	[m]	[cm]	[deg]	
1	1	0.3375	0.9157	0.18645	-3	21.8	14.07	40	0	2
2	2	0.3375	0.9157	0.18645	0	19.9	12.17	40	0	2
3	3	0.3375	0.9157	0.18645	3	18	10.27	40	0	2
4	0	0	0.47625	4.0389	0	26.8	19.84	0	0	0

Buttons: Add row, Delete last row, Insert row copy, Move (up/down), OK, Cancel, Import, Export, Run ATP, View, Verify, Edit defin., Help

Modelagem da LT no ATP

- Dados da linha (continuação):
 - Horiz: Distância horizontal em relação ao centro da torre;
 - Vtower: altura do cabo em relação ao solo;
 - Vmid: altura do cabo no meio do vão (flecha);
 - Separ: Distância entre condutores no bundle;
 - Alpha: Ângulo de cada condutor no bundle em relação à uma linha horizontal traçada no seu centro;
 - NB: Número de condutores do bundle.
- Clicar em View para verificar a disposição dos cabos.



Modelagem da LT no ATP

- Após clicar em RunATP o componente que representa a linha é criado e os seguintes arquivos são gerados:
 - **LT138_Linnet_3-8.dat**: arquivo com conteúdo parecido com o .atp mostrado anteriormente.
 - **LT138_Linnet_3-8.lib**: o mais importante arquivo utilizado pelo ATP (modelo da linha).
 - **LT138_Linnet_3-8.lis**: arquivo de resultado após processamento do modelo pelo ATP.
 - **LT138_Linnet_3-8.pch**: arquivo para ser usado na criação de outros componentes de linha.
- É importante ressaltar que, no caso do LCC, para cada componente de linha utilizado pelo ATPDRAW deve-se utilizar um .lib diferente, caso contrário o ATP irá utilizar o comprimento da linha do último componente.

Modelagem da LT no Anarede e Anafas

- A linha de 138 kV tem os seguintes parâmetros calculados pela rotina Line Constants do ATP:

$$r_0 = 0,103532 \Omega / \text{km}; \quad x_0 = 0,757629 \Omega / \text{km}; \quad y_0 = 2,29466 \mu \text{S} / \text{km}$$

$$r_1 = 0,09355 \Omega / \text{km}; \quad x_1 = 0,330563 \Omega / \text{km}; \quad y_1 = 4,96285 \mu \text{S} / \text{km}$$

- Os dados calculados em % na base 100 MVA e em MVar, para o modelo p nominal (linha curta) são os seguintes:

$$\ell = 50 \text{ km}; \quad I_{max} = 0,530 \text{ kA}$$

$$V_b = 138 \text{ kV}; \quad S_b = 100 \text{ MVA}; \quad Z_b = V_b^2 / S_b = 190,44 \Omega$$

$$z_0 = \frac{(r_0 + jx_0)\ell}{Z_b} 100 = 2,7182 + j19,892 \%$$

$$MVar_0 = y_0 \ell V_b^2 = 2,185 \text{ MVar}$$

$$z_1 = \frac{(r_1 + jx_1)\ell}{Z_b} 100 = 2,4562 + j8,6789 \%$$

$$MVar_1 = y_1 \ell V_b^2 = 4,7256 \text{ MVar}$$

$$S_{max} = \sqrt{3} V_b I_{max} = 253,36 \text{ MVA}$$

- Se a linha fosse longa deveria ser usado o modelo p corrigido (correções hiperbólicas).

Modelagem da LT no Anarede

- Para o programa Anarede a janela de dados dessa linha é a seguinte:

Dados de Circuito CA (DLIN)

Circuito
Barra De: 9001 Nome: INICIO---138 Ligado
Barra Para: 9002 Nome: FIM-----138 Ligado
Número: 1 Circuitos existentes

Barra Proprietária
 De
 Para

Barra Controlada
 De
 Para
 Ligado

Capacidade
Normal: 253 MVA
Emergência: 253 MVA
Equipamento: 253 MVA

Resistência: 2.1927 %
Reatância: 8.6788 %
Susceptância: 4.7256 Mvar

Tap
Especificado:
Mínimo:
Máximo:
Defasamento: graus
Steps:
 Controle Congelado

Agregadores

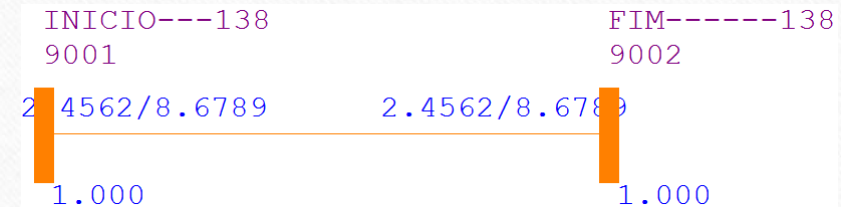
Tensão Barra
Tensão Especificada

Shunt Equivalente
Injeção De: Mvar
Injeção Para: Mvar

Shunt Individualizado (DBSH)
Injeção De: 0 Mvar
Injeção Para: 0 Mvar

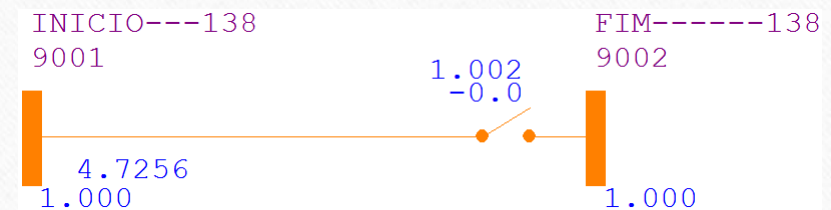
Inserir Alterar Remover Limpar Fechar

No modo de visualização de R/X tem-se:



As capacidades foram consideradas todas iguais (253 MVA).

Os terminais da linha podem ser desligados individualmente, conforme mostrado abaixo (modo de exibição de admitâncias):



O Anarede calcula automaticamente a tensão no terminal aberto.

Modelagem da LT no Anarede

- O trecho de arquivo texto (Anarede) para definição da linha e de seus dados terminais é o seguinte:

```
DBAR
(Num)OETGb( nome )Gl( V)( A)( Pg)( Qg)( Qn)( Qm)( Bc )( Pl)( Ql)( Sh)Are(Vf)M(1)(2)(3)(4)(5)(6)(7)(8)(9)
9001 GINICIO---138 51000 8
9002 GFIM-----138 51000 8
99999
DLIN
(De )d O d(Pa )NcEP ( R% )( X% )(Mvar)(Tap)(Tmn)(Tmx)(Phs)(Bc )(Cn)(Ce)Ns(Cq)(1)(2)(3)(4)(5)(6)(7)(8)(9)(10)
9001 9002 1 2.45628.67894.7256 253 253
99999
DARE
(Ar (Xchg) ( Identificacao da area ) (Xmin) (Xmax)
8 0. * Minha concessionária * 0. 3000.
99999
DGLT
(G (Vmn) (Vmx) (Vmne) (Vmxe)
5 .95 1.05 .9 1.05
99999
DGBT
(G ( kV)
G 138.
99999
FIM
```

Modelagem da LT no Anafas

- Para o programa Anafas a janela de dados dessa linha é a seguinte:

Dados de Linha CA

Identificação

Barra De: 9001 Nome: INICIO---138

Barra Para: 9002 Nome: FIM-----138

Número do Circuito: 1 Área: 8 Ligado

Nome: LT138 Comprimento (km): 50

Sequência Positiva

Resistência (R1 %): 2.4562 Reatância (X1 %): 8.6789

Susceptância (S1 Mvar): 4.726

Sequência Zero

Resistência (R0 %): 2.7182 Reatância (X0 %): 19.892

Susceptância (S0 Mvar): 2.185

Capacidade de Interrupção (kA)

Terminal De: Terminal Para:

Inserir Alterar Remover Fechar

No modo de visualização de R/X tem-se:

INICIO---138		FIM-----138
9001		9002
2.45/8.67	2.45/8.67	
2.71/19.89	2.71/19.89	

Nos arquivos da EPE e do ONS a susceptância das linhas não está representada.

Modelagem da LT no Anafas

- O trecho de arquivo texto (Anafas) para definição da linha e de seus dados terminais é o seguinte:

```
DBAR
(NB  CEM      BN          VBAS DISJUN          DDMMAAADDMMAAAA IA SA
(-----= -----
 9001  INICIO---138      138   30          8
 9002  FIM-----138    138   30          8
99999
DCIR
(-----Dados de Circuitos-----
(BF  CE  BT   NCT  R1   X1   R0   X0   CN  S1  S0   TAP  TB  TCIA DEFE KM CD RNDE  XNDE CP RNPA  XNPA SA
(-----
 9001  9002  1L2.45628.67892.718219.892LT138 4.7262.185          8   50.
99999
DARE
(NN  C          NOME
(--- =          -----
 8          MINHA CONCESSIONÁRIA
99999
```

Modelagem da LT no Anafas

- As impedâncias mútuas de sequência zero entre trechos de circuito duplo ou entre circuitos paralelos de outras linhas, mesmo de tensão diferente (faixa de passagem compartilhada) pode ser representada no Anafas.
- No arquivos de Anafas da EPE e do ONS, mesmo para linhas que são paralelas somente em um trecho, a mútua é modelada como se as linhas fossem paralelas do início ao fim. O correto é inserir barras fictícias para separar trechos paralelos e trechos não paralelos.
- Para essa linha, modificada para torre de circuito duplo a impedância mútuas de sequência zero é aproximadamente:

$$z_{0m} = 0,18 + j0,28 \Omega/\text{km}; \quad Z_{0m} = 4,7259 + j7,3514\%$$

- Os dados de mútua podem ser criados usando o ícone destacado em azul da barra de ferramentas desenho:



Modelagem da LT no Anafas

- Considerando uma linha com 2 circuitos iguais da linha anterior e com mútua de sequência zero a tela de dados de mútua é a seguinte:

Dados de Impedância Mútua

Trecho 1

Barra De: 9001 Nome: INICIO---138

Barra Para: 9002 Nome: FIM-----138

Número do Circuito: 1

Trechos: 0.00% - 100.00% Início (%): 0 Fim (%): 100

Trecho 2

Barra De: 9001 Nome: INICIO---138

Barra Para: 9002 Nome: FIM-----138

Número do Circuito: 2

Trechos: Início (%): 0 Fim (%): 100

Resistência (Rm %): 4.7259 Reatância (Xm %): 7.3514 Área: 8 Ligado

Inserir Alterar Remover Fechar

- O uso da interface gráfica é indicado somente para visualização de mútuas.

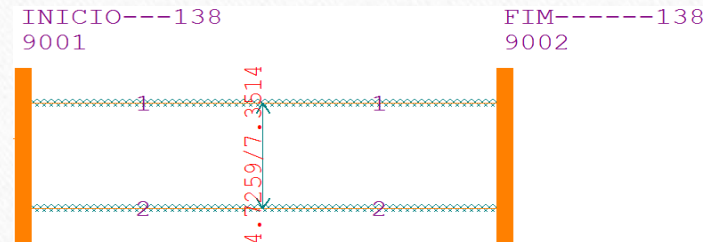
Modelagem da LT no Anafas

- Para a definição das mútuas é indicado o modo de entrada por arquivo texto.
- O arquivo de dados seria o seguinte, lembrando que os dois circuitos da linha saindo e chegando na mesma barra.

```

DBAR
(NB  CEM      BN          VBAS DISJUN          DDMMAAAADDMMAAAA IA SA
(-----= -----          -----          -----
 9001  INICIO---138      138    30          8
 9002  FIM-----138    138    30          8
99999
DCIR
(-----Dados de Circuitos-----
(BF  CE  BT   NCT  R1    X1    R0    X0    CN  S1  S0   TAP  TB  TCIA DEFE KM  CD  RNDE  XNDE CP  RNPA  XNPA SA
(-----
 9001  9002  1L2.45628.67892.718219.892LT138  4.7262.185  8  50.
 9001  9002  2L2.45628.67892.718219.892LT138  4.7262.185  8  50.
99999
DMUT
(-----Dados de Mutua-----
(BF1 CE BT1   N1 BF2   BT2   N2  RM   XM          I1  F1  I2   F2 IA SA
(-----=
 9001  9002   1 9001   9002   24.72597.3514          8
99999
DARE
(NN  C          NOME
(--  =          -----
 8          MINHA CONCESSIONÁRIA
99999
  
```

- Modo de exibição linhas com mútuas:



Modelagem da LT no Anafas

- As mútuas de sequência zero podem também ocorrer entre circuitos diferentes, como apresentado a seguir, envolvendo as linhas ligadas em Getulina, modo de exibição linhas com mútuas:

