Fluxo de carga baseado no método da varredura

Sistemas Elétricos de Potência II

Rev. 2022-10-28

- Nesta seção:
  - modelo dos parâmetros série da rede
  - como modelar esses parâmetros para realizar o cálculo do fluxo de carga pelos métodos de varredura

- Devido a:
  - grande penetração de fontes de energia renovável nos sistemas de distribuição
  - diversificação da demanda, o que torna o perfil de carga mais intermitente

- É necessário sempre fazer uma análise para determinar como o sistema de distribuição pode responder a diversos eventos, tais como:
  - aumento de patamares de carga
  - falhas no sistema
  - inserção de um gerador distribuído
  - etc.

- Sistemas de distribuição e de transmissão
    - Possuem similaridades
    - Premissa para análise do fluxo de carga:
        - Rede operando em regime permanente

- Informações básicas:
  - Tensões das 3 fases na subestação de distribuição
  - Valores das cargas, modeladas como
    - impedância constante
    - corrente constante
    - potência complexa constante
    - combinação das três (modelo ZIP)

- Pode existir também:
    - informação de potência injetada na barra inicial do sistema:
        - por meio da medição presente na subestação
- Na análise de um fluxo de carga em sistemas de distribuição:
    - normalmente estamos interessados em obter os valores de grandezas
        - como na análise do fluxo de carga na transmissão

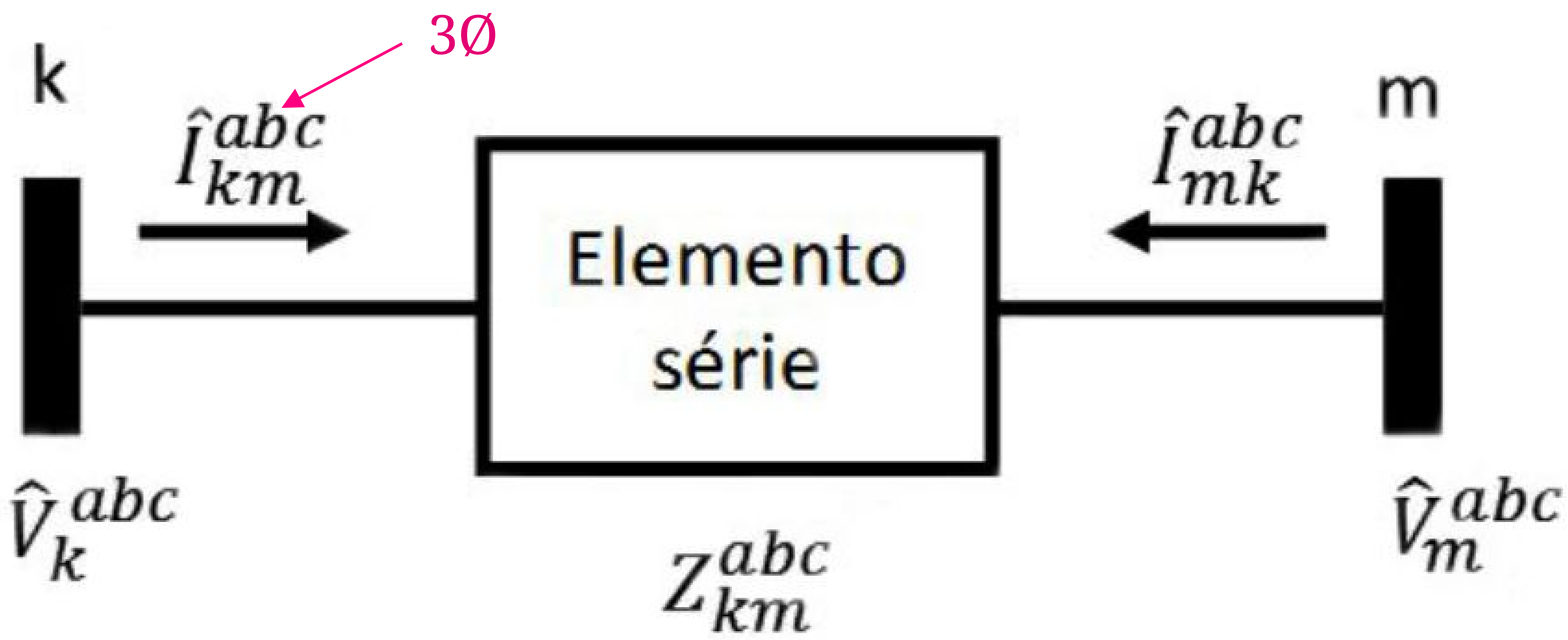
- Grandezas
  - Magnitudes das tensões e ângulos nas barras do sistema
  - Fluxos de potências ativa e reativa nas linhas
  - Perdas de potência nos segmentos de linha e nos alimentadores
- Adicionalmente, temos interesse na análise da
  - Potência total suprida ao sistema pela subestação
  - Carga total em uma determinada barra baseado:
    - no modelo de carga considerado

- Em redes de distribuição existem desbalanços de:
  - carga
  - parâmetros
- Para transmissão:
  - modelo monofásico da rede
- Para distribuição
  - modelo trifásico da rede
- Parâmetros encontrados na rede de distribuição:
  - série
  - shunt

Descrição dos parâmetros

Parâmetros série	Parâmetros shunt
• Linhas de distribuição • Transformadores • Reguladores de tensão	• Cargas concentradas • Cargas distribuídas • Elementos shunt (bancos de capacitores)

Modelo genérico série



- modelado por:
  - matriz 3x3: impedância trifásica
  - matriz 3x1: tensões das barras e correntes nos ramos:

Matrizes do modelo trifásico

$$\check{V}_k^{abc} = \begin{bmatrix} V_k^a \measuredangle \theta_k^a \\ V_k^b \measuredangle \theta_k^b \\ V_k^c \measuredangle \theta_k^c \end{bmatrix}$$

tensões trifásicas

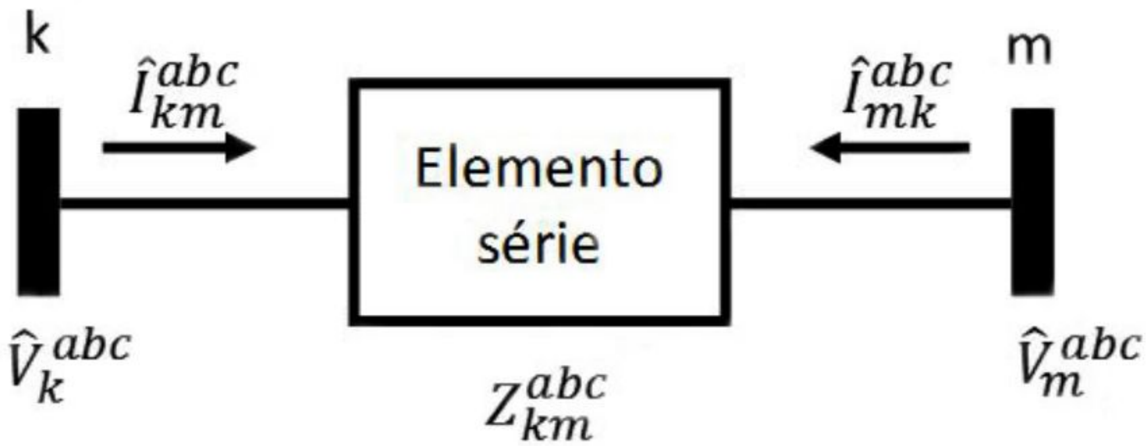
$$\check{I}_{km}^{abc} = \begin{bmatrix} I_{km}^a \measuredangle \phi_{km}^a \\ I_{km}^b \measuredangle \phi_{km}^b \\ I_{km}^c \measuredangle \phi_{km}^c \end{bmatrix}$$

correntes trifásicas

$$Z_{km}^{abc} = \begin{bmatrix} Z_{km}^{aa} & Z_{km}^{ab} & Z_{km}^{ac} \\ Z_{km}^{ba} & Z_{km}^{bb} & Z_{km}^{bc} \\ Z_{km}^{ca} & Z_{km}^{cb} & Z_{km}^{cc} \end{bmatrix}$$

impedância trifásica

- as matrizes do slide anterior são para modelos trifásicos
- para linhas de distribuição com
  - dois condutores (bifásicas)
    - matrizes com dimensões 2x2 e 2x1
  - um condutor (monofásicas)
    - elementos unitários



- Equações genéricas que definem o modelo da entrada (barra k) e saída (barra m) do elemento série

$$\breve{V}_k^{abc} = [a]\breve{V}_m^{abc} + [b]\breve{I}_{km}^{abc}$$

matrizes

$$\breve{I}_{km}^{abc} = [c]\breve{V}_m^{abc} + [d]\breve{I}_{km}^{abc}$$

- Equação da saída em função da entrada

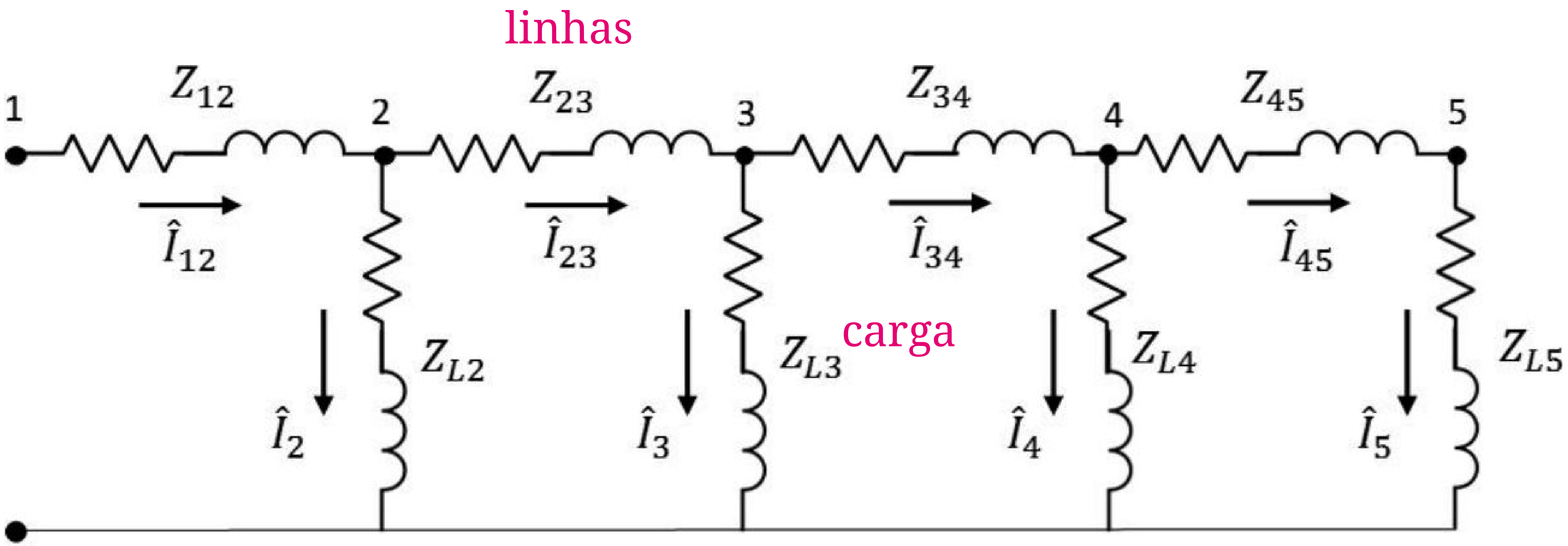
$$\breve{V}_m^{abc} = [A]\breve{V}_k^{abc} + [B]\breve{I}_{mk}^{abc}$$

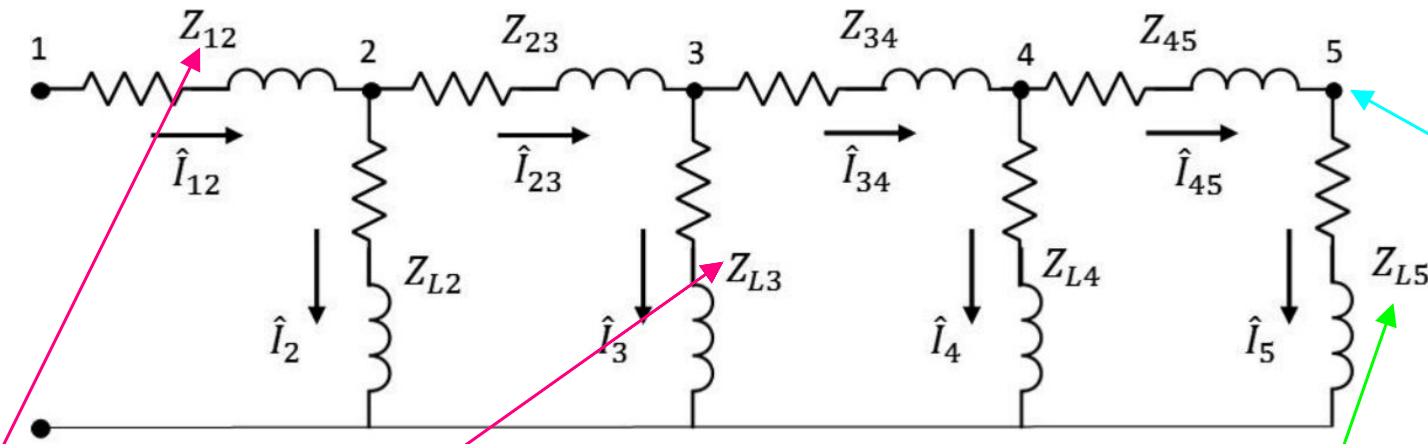
- As matrizes [a], [b], [c], [d], [A] e [B] podem ser determinadas por meio da relação dos parâmetros série
- As matrizes [b], [d] e [B] são matrize de impedâncias
- As matrizes [a], [c] e [A] são matrizes identidade
- Para o caso de transformadores essas matrizes podem ser modificadas:
    - incluindo o tap do transformador
    - a relação de defasagem angular

- Os sistemas de distribuição são, em sua maioria, redes radiais ou fracamente malhadas
- Mudanças atuais: introdução de geração distribuída e recursos distribuídos
- Técnicas iterativas normalmente utilizadas para realizar o cálculo de fluxo de carga nos sistemas de transmissão não são empregadas com sistemas de distribuição devido
  - às características pobres de convergência
  - devido à impossibilidade de utilização dos métodos desacoplados para esse fim

Método das somas das correntes

- Técnicas específicas para sistemas de distribuição são utilizadas, empregando a varredura da rede (ou método das somas das correntes) para determinas correntes e tensões de acordo com os parâmetros do sistema

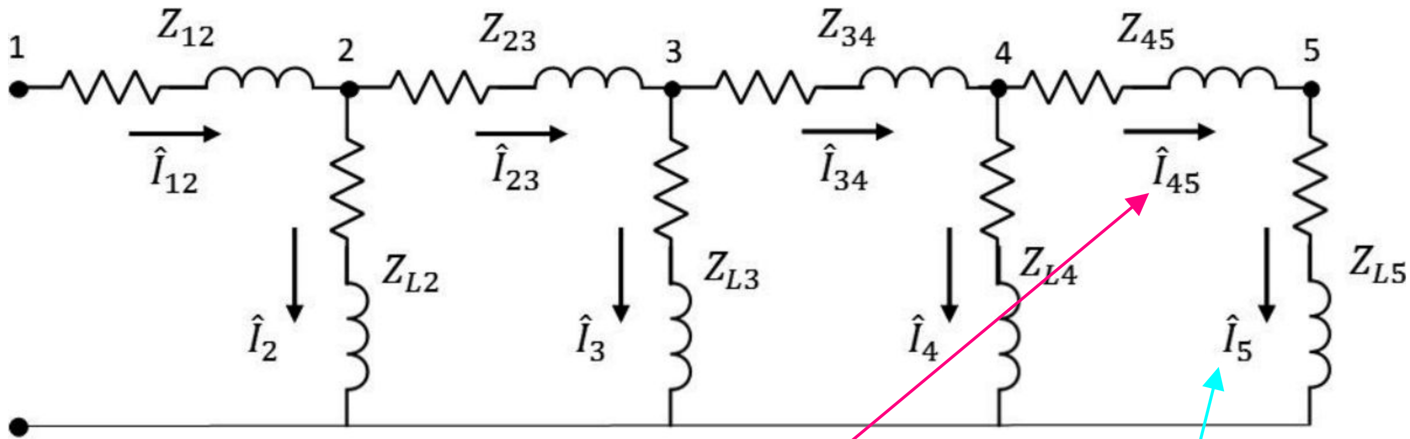




- Premissa: as cargas são conhecidas assim como as impedâncias das linhas

- Corrente que passa pela carga conectada na barra 5, assumindo uma tensão inicial nesta barra (normalmente a tensão nominal)

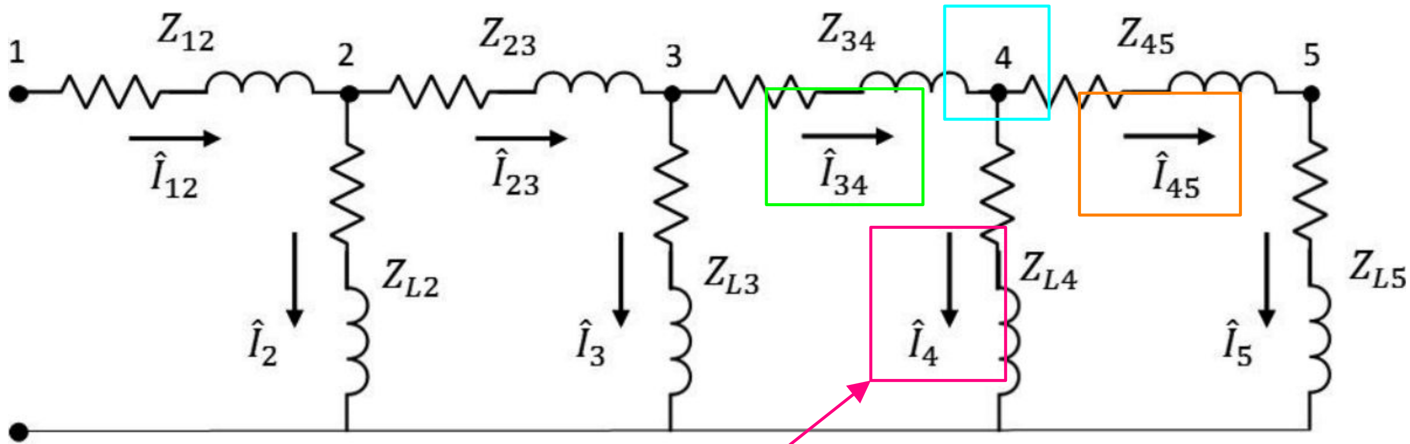
$$\breve{I}_5 = \frac{\breve{V}_5}{Z_{L5}}$$



- Para a barra terminal, a corrente que passa pela linha que conecta os nós 4 e 5 é a mesma corrente da carga

- Podermos utilizar as equações dos slides anteriores para calcular a tensão na barra 4, assumindo que
  - [a] = 1
  - [b] = impedância da linha

$$\check{V}_4 = \check{V}_5 + Z_{45}\check{I}_{45}$$



- A corrente na carga conectada à barra 4 é calculada:

$$\breve{I}_4 = \frac{\breve{V}_4}{Z_{L4}}$$

- Utilizando a lei de Kirchhoff para a corrente no nó 4, a corrente que percorre a linha que conecta os nós 3 e 4 é

$$\boxed{\breve{I}_{34}} = \boxed{\breve{I}_4} + \boxed{\breve{I}_{45}}$$

- O processo se repete para as barras 3, 2, e 1

- Razão entre o valor calculado e especificado:

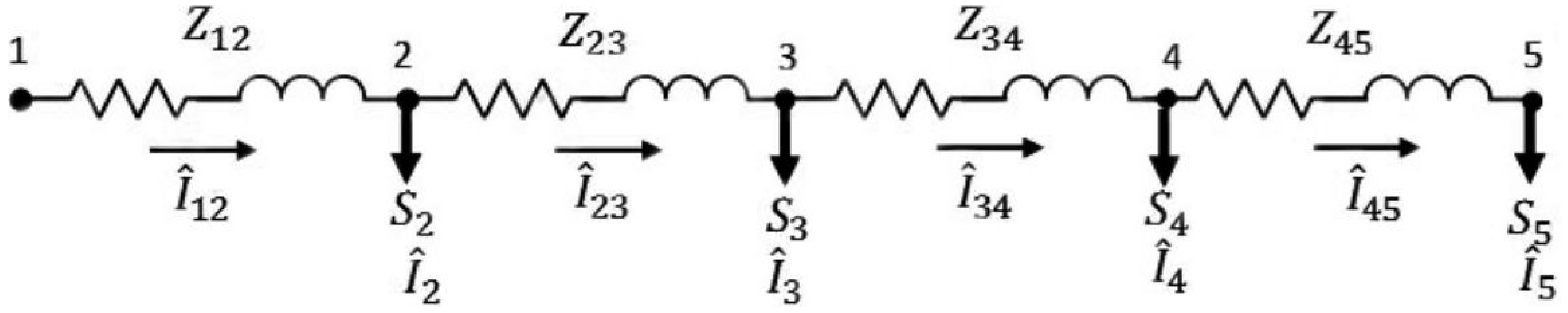
$$Raz^{a}o = \frac{\breve{V}_1^{esp}}{\breve{V}_1}$$

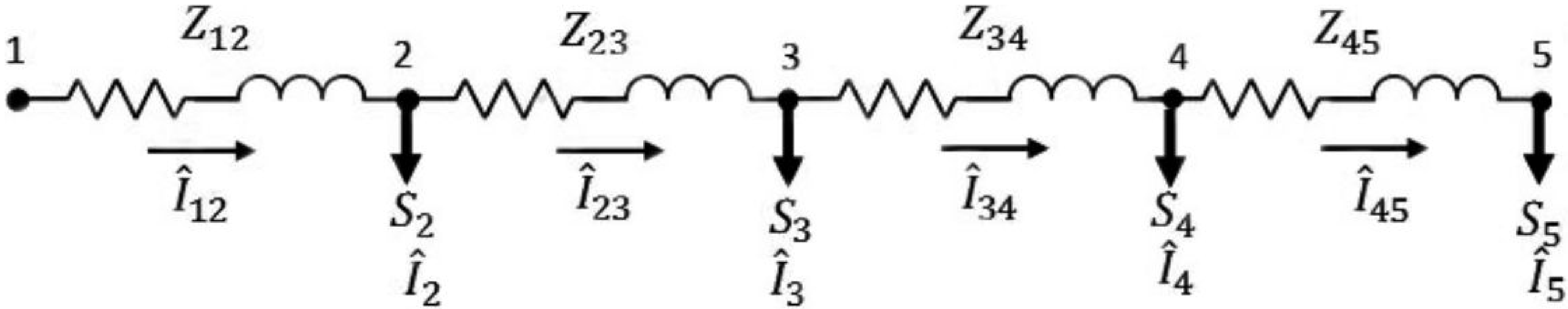
tensão no nó 1

- Como a rede é linear, basta que a varredura seja feita agora na direção da carga 5, utilizando-se desta razão para atualizar os valores de tensão e calcular novamente as correntes

- Temos um processo de varredura da rede iniciada da barra terminal em direção à fonte e, posteriormente, um processo de varredura da fonte em direção à carga

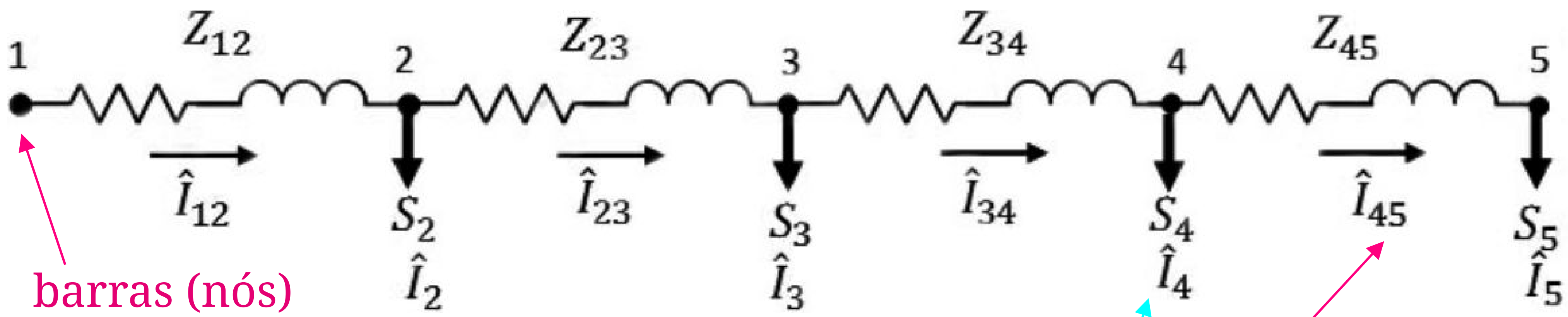
- As cargas são apresentadas como cargas de potência constante, nas quais podemos encontrar um par de potência ativa e reativa (potência complexa)



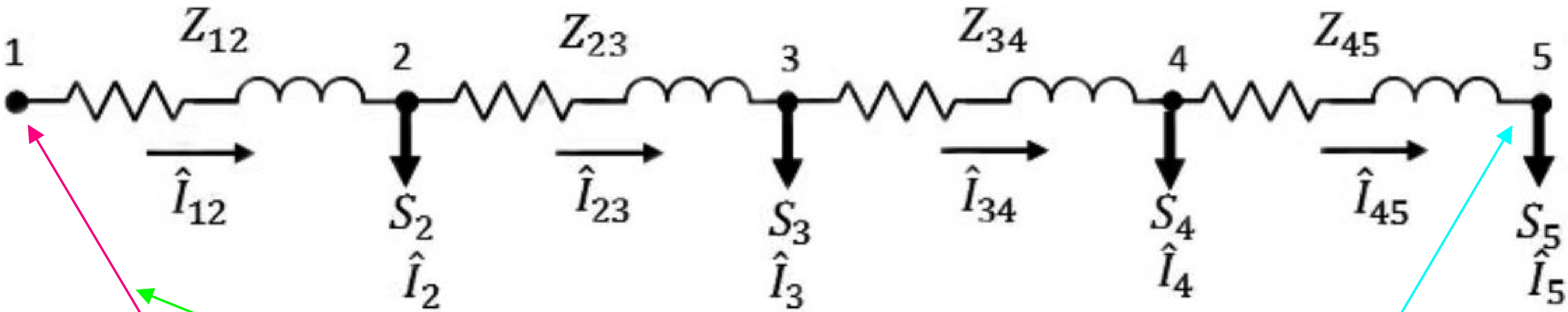


- Cálculo da corrente na carga de uma determinada barra k
    - Adotando um valor inicial para a tensão nesta barra
    - Utilizando o valor da potência complexa fornecida:

$$\breve{I}_k = \left(\frac{S_k}{\breve{V}_k} \right)^*$$

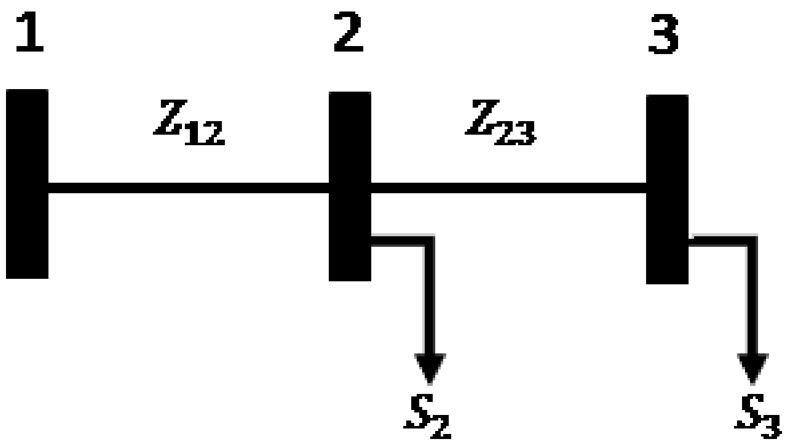


- A barra terminal 5 inicia o processo
- Calculamos a corrente na linha que conecta a barra 4 à 5
- Obtemos a tensão na barra 5
- Calculamos a corrente na carga conectada à barra 4
- Seguimos o processo até obter a corrente na barra 1
- Comparamos com o valor especificado



- Comparamos o erro na tensão calculada na barra 1 com a especificada
  - Se esse erro for maior que uma determinada tolerância:
    - adota-se a tensão especificada na barra de referência, e faz-se o cálculo das tensões até a barra terminal, considerando as correntes calculadas anteriormente
- Ao chegar na barra terminal o processo se repete utilizando as novas tensões

Exemplo (p. 74)



- Sistema radial com 3 barras
- Tensão especificada de 7200 V na barra 1
- Calcular o fluxo de carga para obter as tensões nas barras 2 e 3

Dados

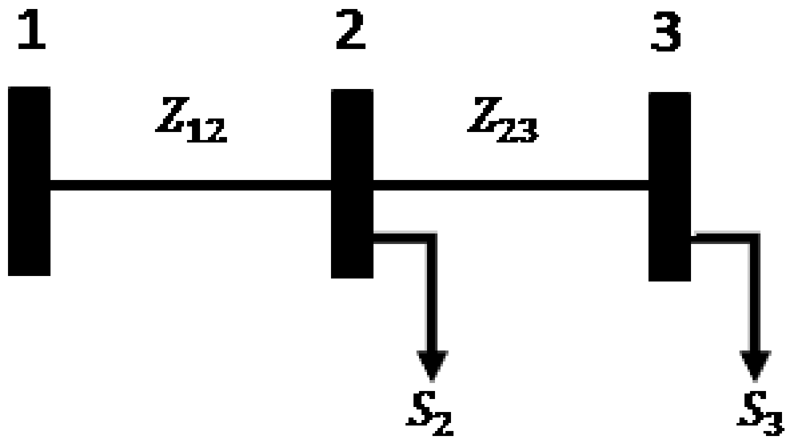
- Z_{12} = 0,1705 + j0,3409 Ω
- Z_{23} = 0,2273 + j0,4545 Ω

supor um erro máximo de 100 V

- P_2 = 1500 kW
- Q_2 = 750 kVAr

P2=1500+750j

- P_3 = 900 kW
- Q_3 = 500 kVAr



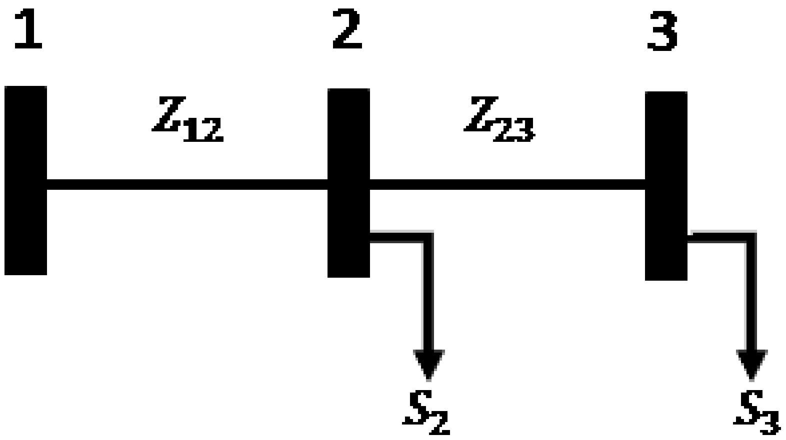
Resolução

- Corrente na barra 3

125+69,4j

$$\breve{I}_3 = \left(\frac{(900 + j500)\times 1000}{7200\measuredangle 0^\circ}\right)^* = \boxed{143{,}0\measuredangle -29{,}0^\circ}$$

$$\boxed{\breve{I}_3 = \breve{I}_{23}}$$



- Tensão na barra 2

$$\breve{V}_2 = \breve{V}_3 + Z_{23}\breve{I}_{23}$$

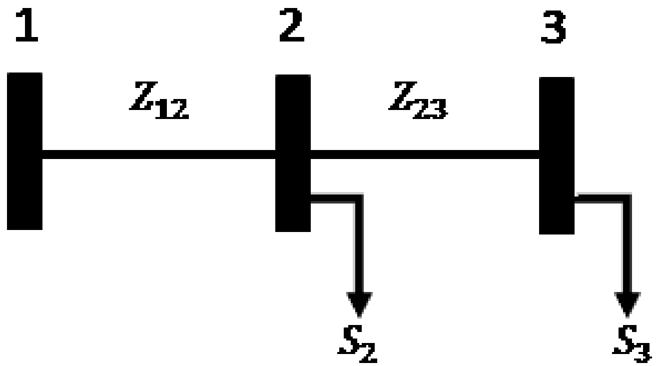
125+69,4j

$$= 7200\measuredangle 0 + (0{,}2273 + j0{,}4545)\cdot \boxed{143{,}0\measuredangle -29{,}1}$$

$$= 7260{,}1\measuredangle 0{,}32\ V$$

7260+40,5j

(conferir os cálculos....)



- Corrente no ramo 1-2, calculada com base na *Lei de Kirchhoff das Correntes* (LKC)

332,3-171,5j

$$\breve{I}_{12} = \breve{I}_{23} + \breve{I}_{2} = 373,9\measuredangle -27,3 \text{ A}$$

I_{23} vem do slide anterior

I_2 calcula como no slide anterior

- Tensão na barra de referência (barra 1)

7375+124,9j

$$\breve{V}_{1} = \breve{V}_{2} + Z_{12}\breve{I}_{12} = 7376,2\measuredangle 0,97 \; V$$

- Erro entre a tensão calculada e especificada na barra 1

$$Erro = \left|7200 - 7376,2\right| = 176,2 \text{ V}$$

(a tolerância está acima do estabelecido)

- Caminho inverso para calcular a tensão na barra 2, a partir da tensão de referência atribuída à barra 1

$$\begin{aligned}\breve{V}_2 &= \breve{V}_1 - Z_{12}\breve{I}_{12} \\ &= 7200\measuredangle 0 + (0{,}1705 + j0{,}3409)\cdot \boxed{373{,}9\measuredangle -27{,}2} \\ &= 7085{,}4\measuredangle -0{,}68\ V\end{aligned}$$

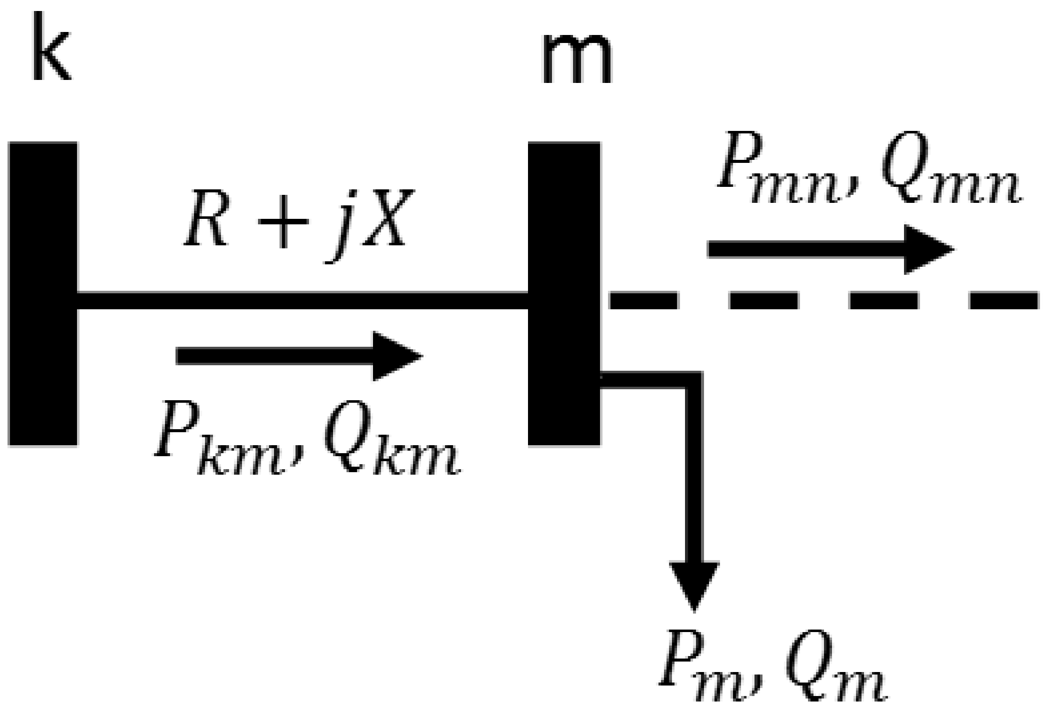
slide anterior

- Tensão na barra 3

$$\breve{V}_3 = \breve{V}_2 - Z_{23}\breve{I}_{23} = 7026{,}0\measuredangle -1{,}02\ \mathrm{V}$$

- A partir daqui, retornamos ao passo 1, recalculando a corrente e fazendo a soma das correntes até obter novamente a tensão na barra 1 e testando o erro no passo 5, até que este esteja abaixo da tolerância exigida

Método da soma das potências



- Método alternativo ao das somas das correntes
- Também faz a varredura do sistema de forma direta e inversa

- Em vez de utilizar a Lei de Kirchhoff para somar as correntes, são os valores das cargas e as perdas que são somadas no caminho partindo da barra terminal e terminando na barra de referência

- As tensões das barras são calculadas através de uma equação biquadrada, partindo da barra de referência e terminando na barra terminal, sempre tomadas duas a duas

- Inicialmente a potência equivalente para cada barra é calculada somando as potências referentes às cargas na barra e às perdas de potência da linha a jusante da barra para o qual o cálculo está sendo feito

- Equações para cálculos das perdas nas linhas

$$P_p = R\left(\frac{P^2 + Q^2}{\left|\breve{V}_m\right|^2}\right) \qquad Q_p = X\left(\frac{P^2 + Q^2}{\left|\breve{V}_m\right|^2}\right)$$

- Onde

$$P = \sum (P_m + P_{mn}) \qquad Q = \sum (Q_m + Q_{mn})$$

- Cálculo de P_{km} e Q_{km}

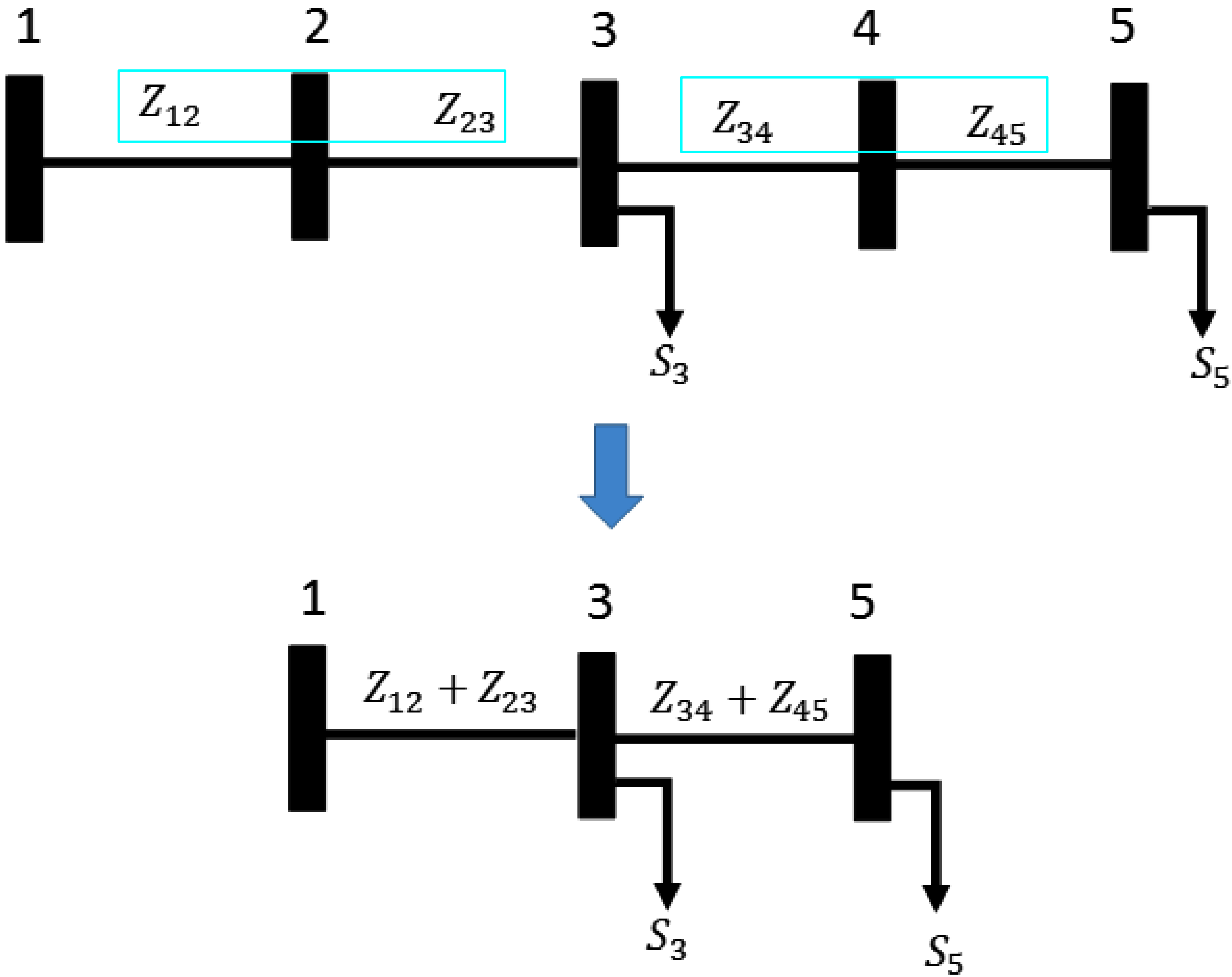
$$P_{km} = P + P_p \qquad\qquad Q_{km} = Q + Q_p$$

- Na primeira iteração as perdas não são levadas em consideração

- Posteriormente as tensões são atualizadas utilizando:

$$V_m^4 + [2(PR + QX) - V_k^2]V_m^2 + (P^2 + Q^2)(R^2 + X^2) = 0$$

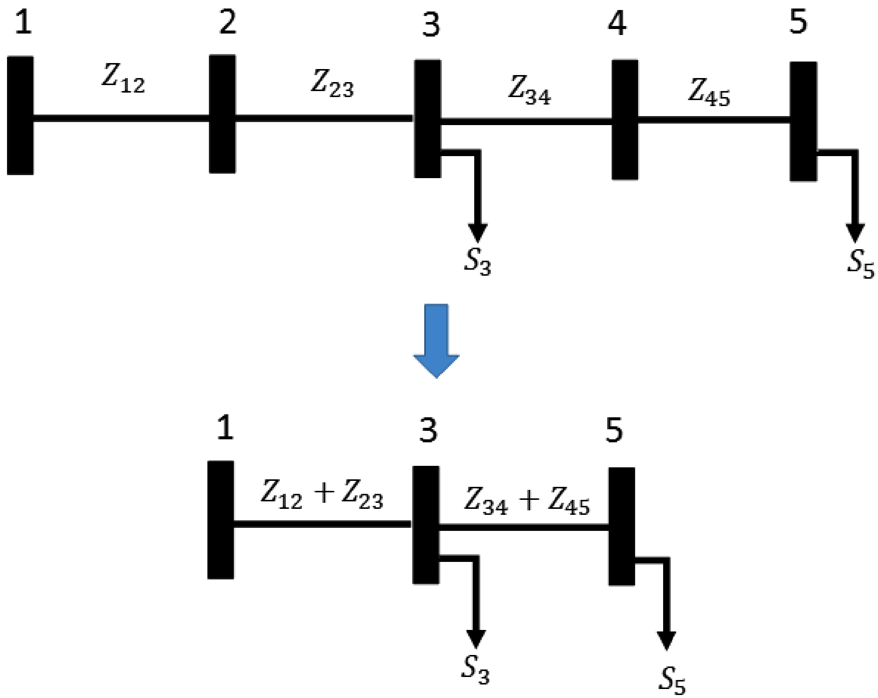
Técnica da redução da rede



- A redução é feita quando existem na rede nós cuja potência ativa e reativa seja nula, de forma que as impedâncias das linhas a montante e a jusante podem ser combinadas em uma única linha

- Inicialmente a rede possui 5 barras, mas apenas duas delas possuem carga, as barras 3 e 5

- Os ramos 1-2 e 2-3 podem ser unidos assim como os ramos 3-4 e 4-5, somando as impedâncias das linhas

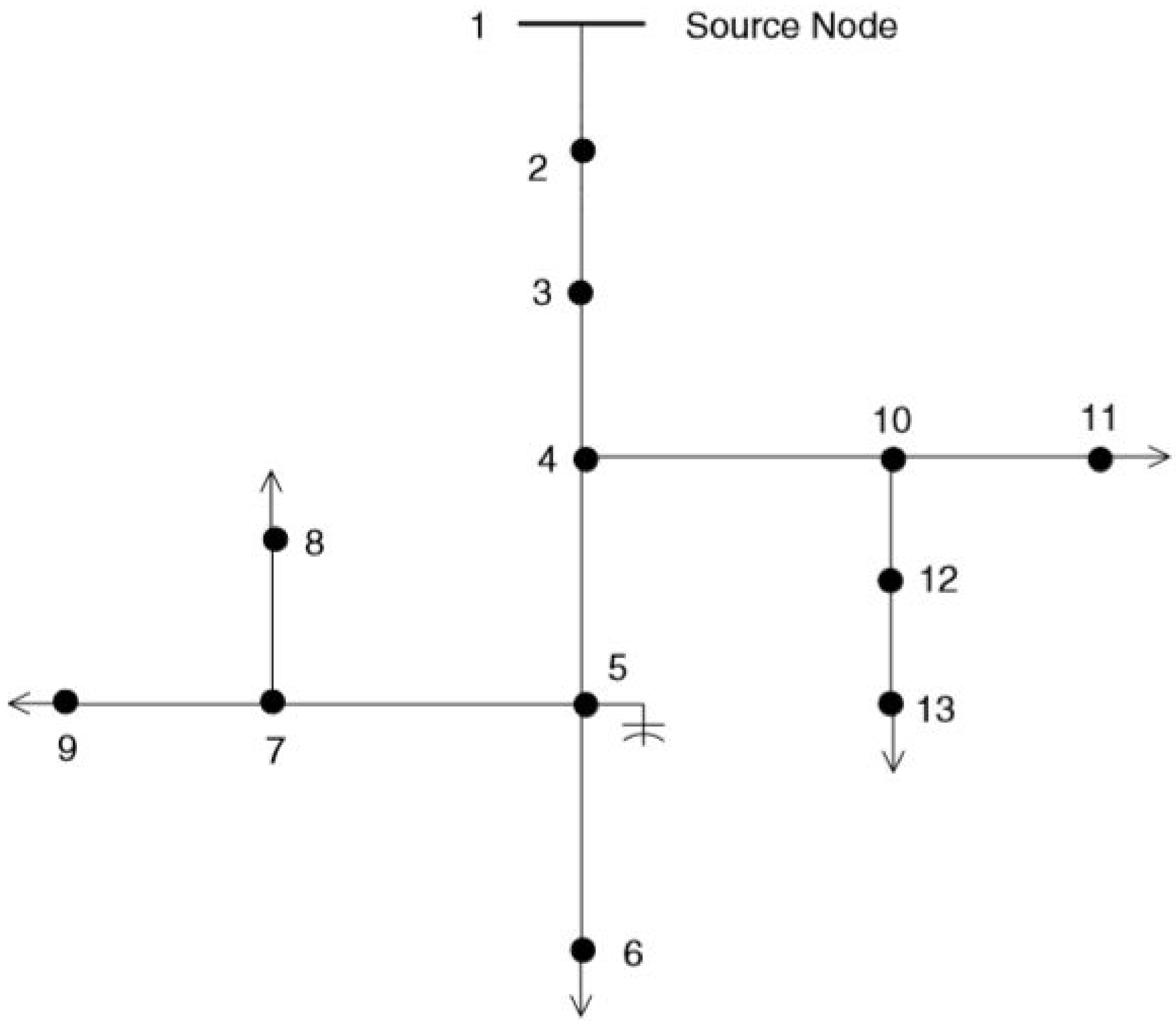


- As susceptâncias shunt das linhas de distribuição são desprezadas

- O resultado é um sistema de três barras

- A escolha do método apropriado depende especificamente da aplicação e do tipo de rede a ser analisada

Exemplo (p. 77)



Descrição do algoritmo

- Resolver o algoritmo de fluxo de carga pelo método de varredura em uma rede de 13 barras
- Assumir as tensões trifásicas nominais nas barras terminais (6, 8, 9, 11 e 13)
- Começando da barra 13, calcular a corrente na barra (utilizando a potência complexa da carga total e os capacitores, se presentes)
- Com a corrente calculada, aplique a lei das tensões de Kirchhoff (a soma das tensões em torno de uma malha fechada é zero) para calcular as tensões nas barras 12 e 10

Descrição do algoritmo

- A barra 10 consiste em um nó de junção, uma vez que existem ramos laterais em duas direções

- Deve-se calcular a corrente a partir da potência complexa na barra 11 e posteriormente calcular a tensão na barra 10 e considerar esta como valor de referência

- Usando o valor de referência da tensão na barra 10, calcule a corrente na barra 10 a partir da potência complexa nessa barra

- Aplique a lei de Kirchhoff para as correntes para determinar a corrente fluindo da barra 4 para a barra 10

Descrição do algoritmo

- Calcule a tensão na barra 4, esta barra é uma barra de junção, assim, uma barra terminal (6, 8 ou 9) deve ser escolhida para reiniciar o cálculo da corrente que flui por outros ramos que partem desta barra

- Selecione a barra 6, por exemplo, e calcule a corrente nesta barra utilizando a potência complexa nela. Siga calculando a tensão na barra 5, que é outra barra de junção

- Vá até a barra 8 e calcule a injeção de corrente nesta barra a partir da potência complexa

- Calcule a corrente no ramo e a tensão na barra 7

Descrição do algoritmo

- Calcule a injeção de corrente na barra 9 e em seguida a tensão na barra de junção 7
- Utilizando esta tensão calculada, calcule a injeção de corrente na barra 7, aplique a lei de Kirchhoff das correntes (LKC) na barra 7 para calcular a corrente fluindo no segmento da barra 5 para 7
- Calcule novamente a tensão na barra 5, em seguida calcule a injeção de corrente na barra 5 e aplique a LKC para determinar o fluxo de corrente da barra 4 para 5

Descrição do algoritmo

- Calcule a tensão na barra 4 e em seguida a injeção de corrente nesta barra. Aplique a LKC para calcular a corrente da barra 3 à 4

- Calcule a tensão na barra 3, realize o procedimento semelhante ao passo 13 para obter a corrente no ramo entre as barras 2 e 3

- Calcule a tensão na barra 2, realize o procedimento semelhante ao passo 14 para obter a corrente no ramo entre as barras 1 e 2 e calcule a tensão na barra 1

Descrição do algoritmo

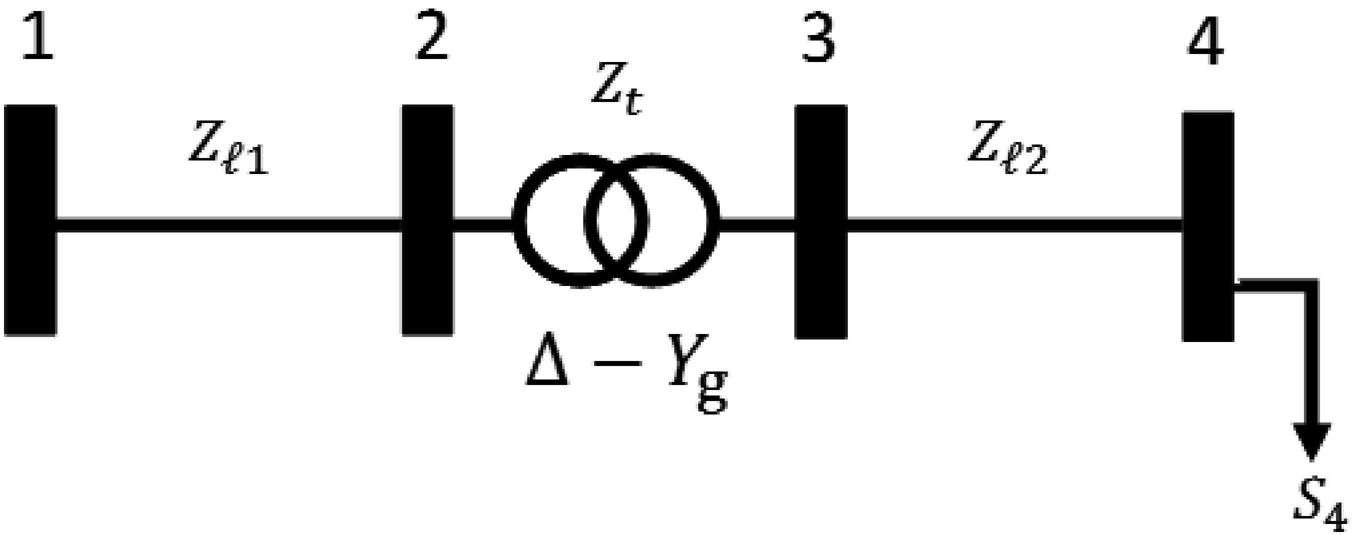
- Neste ponto termina-se a primeira varredura das barras terminais em direção à barra de referência. A tensão calculada na barra 1 deve ser comparada com o valor de referência e se estiver dentro da tolerância pare o processo

- Caso a tensão não esteja dentro da tolerância, assume-se o valor de referência na barra 1 e se inicia o processo de cálculo das tensões nodais desde a barra de referência em direção às barras terminais, utilizando a Equação 2.6, até que todas as tensões nas barras terminais sejam novamente calculadas, terminando a primeira iteraçã

Descrição do algoritmo

- Inicie novamente a partir do passo 1, mas utilizando as tensões das barras terminais calculados no passo anterior, siga novamente até o passo 16 para checar a tolerância. Se o critério de tolerância for atingido pare, caso contrário siga novamente para o passo 17 e 18

Exemplo (p. 78)



Sistema radial de 4 barras

- As linhas de distribuição e cargas são trifásicas
- O transformador conecta as barras 2 e 3
- A impedância do transformador se refere ao lado do secundário (conectado em estrela aterrado)
- Descrever as equações para cada elemento

Resolução

- Uma vez que as linhas, o transformador e a carga é trifásica, podemos fazer o modelamento trifásico da rede

- Inicialmente teremos três matrizes de parâmetros, que se tratam das matrizes de impedância de cada um dos elementos:

$$Z_{l1},\ Z_{l2},\ \text{e}\ Z_t \qquad \text{(matrizes trifásicas 3x3)}$$

- Equações dos elementos série:

$$\breve{V}_k^{abc} = [a]\breve{V}_m^{abc} + [b]\breve{I}_{km}^{abc}$$

$$\breve{I}_{km}^{abc} = [c]\breve{V}_m^{abc} + [d]\breve{I}_{km}^{abc}$$

$$\breve{V}_m^{abc} = [A]\breve{V}_k^{abc} + [B]\breve{I}_{mk}^{abc}$$

- Considerar:
  - matriz de corrente = correntes de linha
  - matriz de tensão = tensões fase neutro

- Descrição das equações para cada um dos elementos que ligam uma barra qualquer do sistema **k**, a outra barra **m**

- 3 conjuntos de equações: um para cada uma das linhas e um para o transformador

- Linha 1

$$\breve{V}_1^{abc} = [a_{12}]\breve{V}_2^{abc} + [b_{12}]\breve{I}_{12}^{abc}$$

$$\breve{I}_{12}^{abc} = [c_{12}]\breve{V}_2^{abc} + [d_{12}]\breve{I}_{12}^{abc}$$

$$\breve{V}_2^{abc} = [A_{12}]\breve{V}_1^{abc} + [B_{12}]\breve{I}_{21}^{abc}$$

- Sendo:

$$[a_{12}] = [A_{12}] = [d_{12}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\breve{I}_{21}^{abc} = -\breve{I}_{12}^{abc}$$

$$[b_{12}] = [B_{12}] = Z_{\ell 1}$$

$$[c_{12}] = 0$$

- Matrizes 3x1 :

$$\breve{V}_1^{abc} \;,\; \breve{V}_2^{abc} \;\text{ e }\; \breve{I}_{12}^{abc}$$

- Linha 2

$$\breve{V}_3^{abc} = [a_{34}]\breve{V}_4^{abc} + [b_{34}]\breve{I}_{34}^{abc}$$

$$\breve{I}_{34}^{abc} = [c_{34}]\breve{V}_4^{abc} + [d_{34}]\breve{I}_{34}^{abc}$$

$$\breve{V}_4^{abc} = [A_{34}]\breve{V}_3^{abc} - [B_{34}]\breve{I}_{34}^{abc}$$

- Sendo:

$$[a_{34}] = [A_{34}] = [d_{34}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[b_{34}] = [B_{34}] = Z_{\ell 2}$$

$$[c_{34}] = 0$$

$\breve{V}_3^{abc}$, $\breve{V}_4^{abc}$ e $\breve{I}_{34}^{abc}$ (matrizes 3x1)

- Transformador
  - tem conexão triângulo--estrela, e sendo assim as matrizes devem considerar a defasagem angular

- N_t : matriz com a relação de transformação e defasagem

$$\breve{V}_3^{abc} = N_t \breve{V}_2^{abc} - Z_t \breve{I}_{23}^{abc}$$

$$N_t = \frac{V_{ns}}{V_{np}} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

V_{ns} : tensão nominal do secundário

V_{np} : tensão nominal do primário

- Equações:

$$N_t \breve{V}_2^{abc} = \breve{V}_3^{abc} + Z_t \breve{I}_{23}^{abc} \rightarrow \breve{V}_2^{abc} = N_t^{-1}(\breve{V}_3^{abc} + Z_t \breve{I}_{23}^{abc})$$

$$\rightarrow \breve{V}_2^{abc} = N_t^{-1} \breve{V}_3^{abc} + N_t^{-1} Z_t \breve{I}_{23}^{abc}$$

$$\breve{V}_2^{abc} = [a_{23}] \breve{V}_3^{abc} + [b_{23}] \breve{I}_{23}^{abc}$$

$$\breve{I}_{23}^{abc} = [c_{23}] \breve{V}_3^{abc} + [d_{23}] \breve{I}_{23}^{abc}$$

$$\breve{V}_3^{abc} = [A_{23}] \breve{V}_2^{abc} - [B_{23}] \breve{I}_{23}^{abc}$$

(continua)

(continuação)

$$[a_{23}] = N_t^{-1} \qquad [b_{23}] = N_t^{-1} Z_t \qquad [c_{23}] = 0$$

$$[d_{23}] = I \text{ (identidade)} \qquad [A_{23}] = N_t \qquad [B_{23}] = Z_t$$

$$\breve{V}_2^{abc} \text{ , e } \breve{I}_{23}^{abc}$$

matrizes 3x1

- Equações de corrente para a carga conectada à barra 4

- Utiliza os valores das impedâncias trifásicas em cada uma das fases:

$$\breve{I}_4^{abc} = \left[\left(\frac{S_4^a}{\breve{V}_4^a} \right)^* \quad \left(\frac{S_4^b}{\breve{V}_4^b} \right)^* \quad \left(\frac{S_4^c}{\breve{V}_4^c} \right)^* \right]^T = \breve{I}_{34}^{abc}$$

- Desta forma, todo o equacionamento necessário para realizar os cálculos pode ser modelado em um software de programação, de forma a definir um processo iterativo