



UFPR



TE 339 – Sistemas Elétricos de Potência I

Sistema por Unidade

Prof. Mateus Duarte
Teixeira

Sistema em Valor Percentual ou Por Unidade (ou PU)

- Sistemas Elétricos de Potência (SEPs) são geralmente formados por vários transformadores elevadores e abaixadores. Em decorrência disso, haverá várias tensões e correntes nominais em cada lado de cada um dos transformadores, tornando os cálculos bastante trabalhosos e complexos.
- Assim, em vez de usarmos as unidades convencionais, como volts, amperes e ohms, é conveniente introduzirmos um sistema de unidades, denominado sistema pu (“por unidade”), no qual, como veremos, todas as relações de transformação de todos os transformadores se tornam unitárias, facilitando enormemente os cálculos.

Definição de PU

- É uma forma de expressar as grandezas elétricas em um circuito de forma normalizada, com base em valores pré-determinados.
- Exemplo:
 - Para uma potência base igual a 100MVA
 - Uma potência de 80MVA terá valor de 0,80 pu ou 80% ($=80\text{MVA}/100\text{MVA}$)

Vantagens do Sistema PU

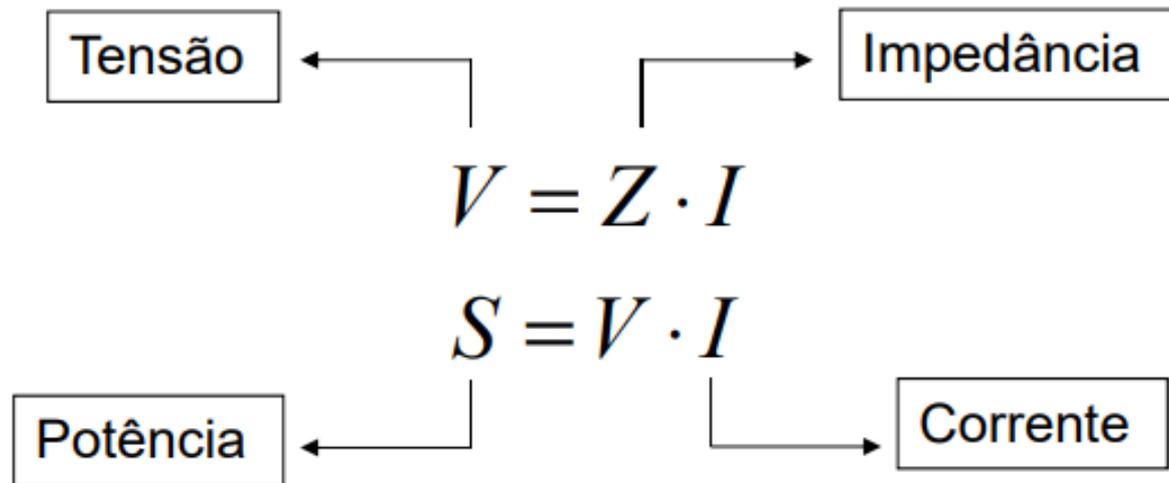
- 1) Os fabricantes de equipamentos tais como geradores, motores e transformadores costumam fornecer reatâncias e impedâncias já em pu ou em %, expressas nas bases nominais dos equipamentos.
- 2) Equipamentos semelhantes (mesma tensão, mesma potência, etc.) têm impedâncias semelhantes quando expressas em pu. Isso facilita os cálculos para substituição de equipamentos e para expansão e reformulação de redes.
- 3) O uso do fator $\sqrt{3}$ é minimizado nos cálculos trifásicos em pu.

Vantagens do Sistema PU

- 4) Como veremos, a impedância de transformadores, quando expressa em pu, é independente do lado (alta, média, baixa tensão) que tomamos como referência. Além disso, a impedância de transformadores torna-se independente do tipo de ligação (delta-estrela, deltadelta, estrela-estrela, etc.).
- 5) Em pu é mais fácil identificar quando os valores de grandezas como tensões e potências se afastam dos valores nominais. Por exemplo, as tensões em qualquer barramento podem variar em $\pm 5\%$ em relação à tensão nominal. Logo, as tensões mínima e máxima permitidas serão respectivamente iguais a 0,95 pu e 1,05 pu em relação à tensão nominal, seja qual for esta.

Sistema PU

- Em princípio, há um grande grau de arbitrariedade na escolha do valor base para determinada grandeza. Em sistemas de potência, entretanto, estamos geralmente mais interessados em quatro grandezas inter-relacionadas, o que fará com que as respectivas bases sejam também inter-relacionadas.
- Os valores percentuais ou PU são determinados a partir das duas relações físicas a seguir:



- Assim, duas grandezas são escolhidas como valores bases e as outras duas são calculadas em relação as bases adotadas.
- Por convenção são escolhidas a tensão e a potência.
- Em SEP as bases geralmente são os valores nominais..

Valores Base

V_{base} e S_{base}

Corrente base:

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{V_{base}}$$

Impedância base:

$$Z_{base} = \frac{V_{base}}{I_{base}} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}}$$

Valores Base

- Tensão em PU:

$$v = \frac{V}{V_{base}} (pu - V)$$

- Potência em PU:

$$s = \frac{S}{S_{base}} (pu - VA)$$

- Impedância em PU:

$$z = \frac{Z}{Z_{base}} = Z \cdot \frac{S_{base}}{V_{base}^2} (pu - \Omega)$$

- Corrente em PU:

$$i = \frac{I}{I_{base}} = I \cdot \frac{V_{base}}{S_{base}} (pu - A)$$

Valores Base

- A potência base adotada é sempre a potência aparente, então:

$$\dot{S}_{pu} = \frac{S}{S_{base}} \angle \theta = \frac{P}{S_{base}} + j \cdot \frac{Q}{S_{base}} = P_{pu} + j \cdot Q_{pu}$$

- Somente a potência aparente é usada como base.

Valores Base

- Portanto:

$$S_{pu} = \frac{S}{S_{base}} \frac{(VA)}{(VA)}$$

$$P_{pu} = \frac{P}{S_{base}} \frac{(W)}{(VA)}$$

$$Q_{pu} = \frac{Q}{S_{base}} \frac{(VAr)}{(VA)}$$

$$Z_{pu} = \frac{|\dot{Z}|}{Z_{base}} = \frac{Z}{Z_{base}}$$

$$R_{pu} = \frac{R}{Z_{base}}$$

$$X_{pu} = \frac{X}{Z_{base}}$$

Observações:

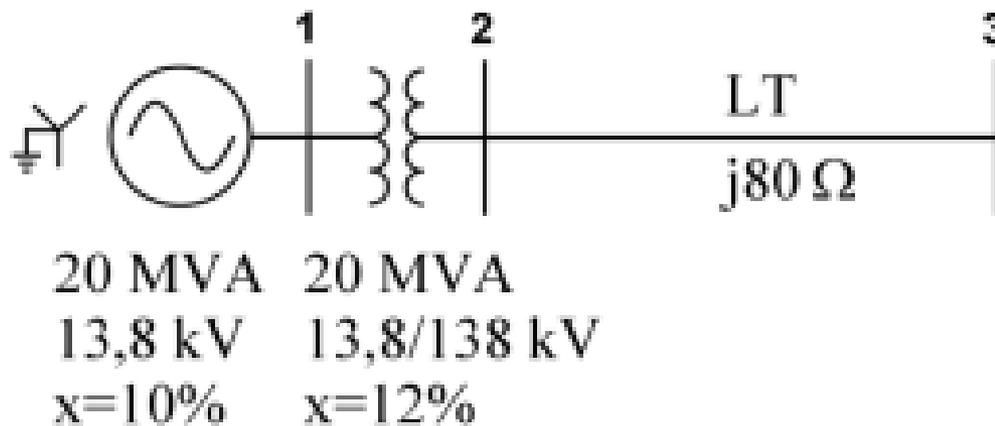
- A potência-base é única e uma só para todos os barramentos do sistema em análise.
- As bases de tensão, corrente e impedância transformam-se de acordo com as relações de transformação usuais dos transformadores.
- Linhas de transmissão e impedâncias em série e em paralelo não afetam as bases de tensão, corrente e impedância. Apenas transformadores afetam tais bases.

Exercício 1:

- Tensão base = tensão nominal = 138 kV
- Potência base = 100 MVA
- Impedância da linha = $0,01 + j0,10$ pu
- Qual o valor da impedância em ohms?

Exercício 2:

- Converta para pu as impedâncias do sistema abaixo e determine as bases de tensão e de impedância em cada barramento. Considere que a potência-base é 20 MVA e que a tensão base no primeiro barramento é 13,8 kV.



Exercício 3:

- Seja um sistema do tipo gerador-linha-carga. Calcular, em PU, o circuito equivalente e a tensão necessária para o gerador manter a tensão na carga em 200V. Sabe-se que a carga absorve 100 kVA com $fp=0,8$ indutivo e que a impedância da linha é $(0,024+j0,08)\Omega$.

Mudança de Base

- As impedâncias de equipamentos tais como geradores, motores e transformadores são geralmente expressas pelo fabricante nas respectivas bases nominais.
- Contudo, as bases do sistema em análise geralmente são diferentes das bases dos equipamentos, sendo necessário transformar de uma para outra e vice-versa.

Mudança de Base

- Mudança de base

Z (base 1) \longrightarrow Z (base 2)

$$Z_2[pu] = Z_1[pu] \cdot \left(\frac{V_{b1}}{V_{b2}} \right)^2 \cdot \frac{S_{b2}}{S_{b1}}$$

Mudança de Base

Exemplo

- Impedância do trafo = 0,1 pu (138 kV / 25 MVA)
- Qual o valor da impedância em pu utilizando uma potência base de 100 MVA?

Base 1:

$V_b = 138 \text{ kV}$

$S_b = 25 \text{ MVA}$

Mudança de Base

Exemplo

- Impedância do trafo = 0,1 pu (138 kV / 25 MVA)
- Qual o valor da impedância em pu utilizando uma potência base de 100 MVA?

Base 1:

$V_b = 138 \text{ kV}$
 $S_b = 25 \text{ MVA}$

$Z = 0,1 \text{ pu}$



Base 2:

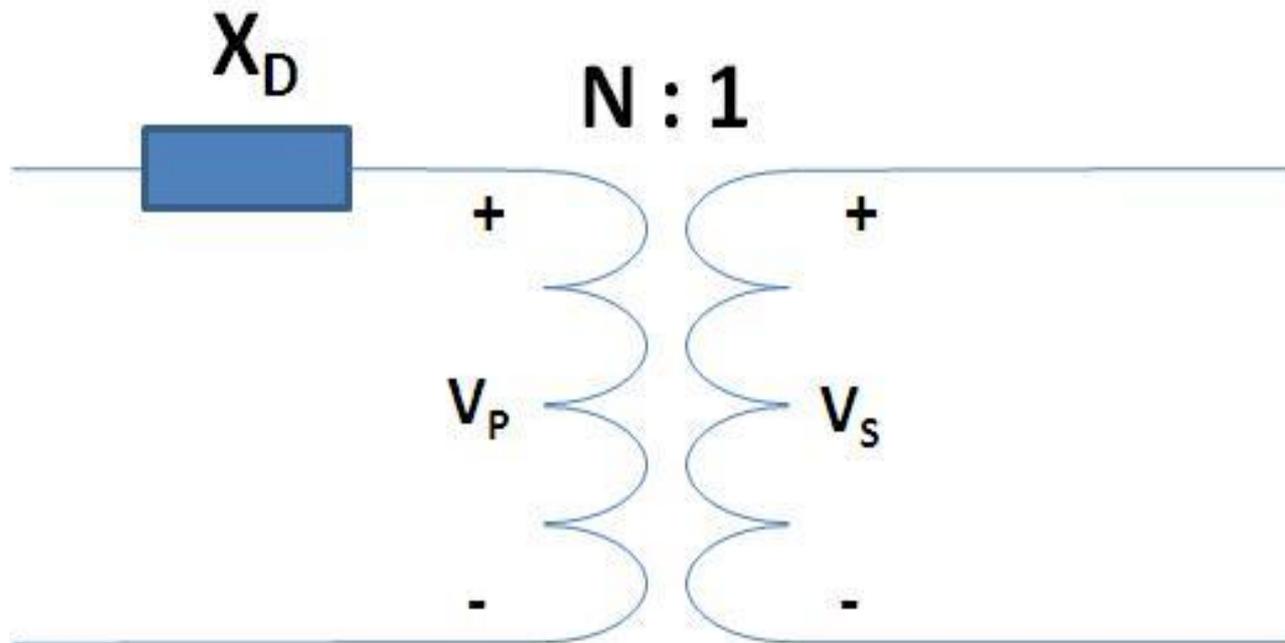
$V_b = 138 \text{ kV}$
 $S_b = 100 \text{ MVA}$

Mudança de Base

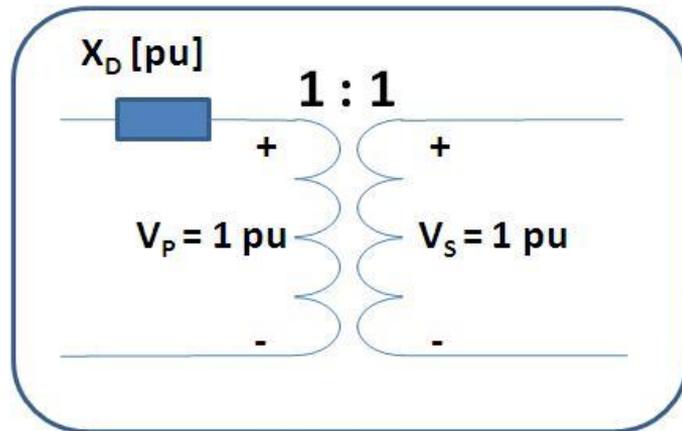
Exercício 4:

- A reatância de fuga (ou tensão de curto-circuito, U_{cc}) de um transformador de 30 MVA, 60/16 kV, é $x_f=8\%$. A base de potência da rede é $S_b=50$ MVA, e as bases de tensão nas zonas do primário e secundário são, respectivamente, $V_{bp}=56,25$ kV e $V_{bs}=15$ kV. Calcule a reatância do transformador para ambas tensões de base da rede.

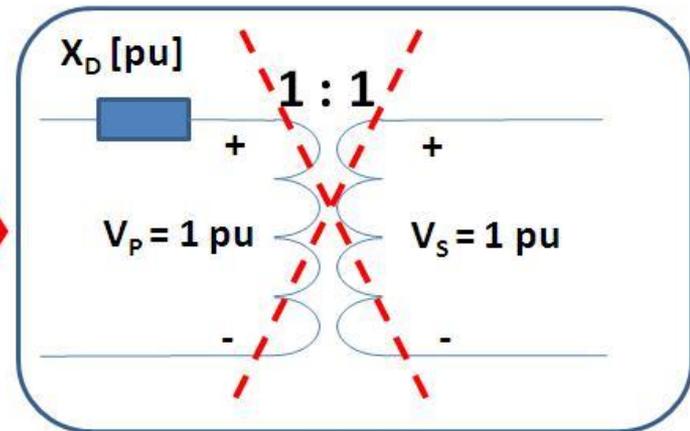
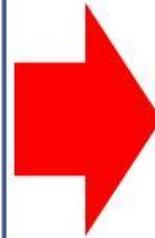
Eliminação de transformadores



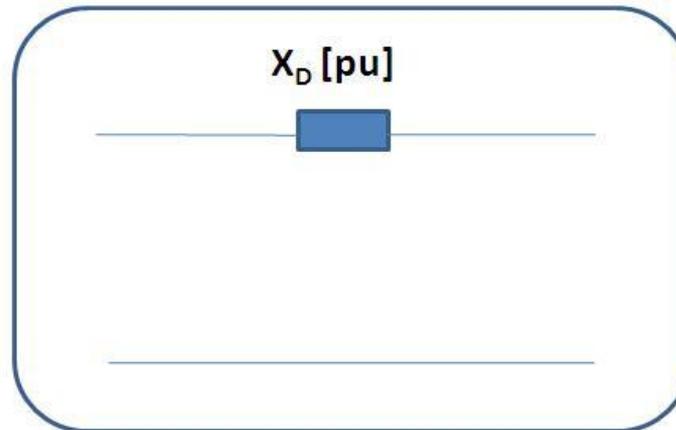
Eliminação de transformadores



1º Passo



2º Passo

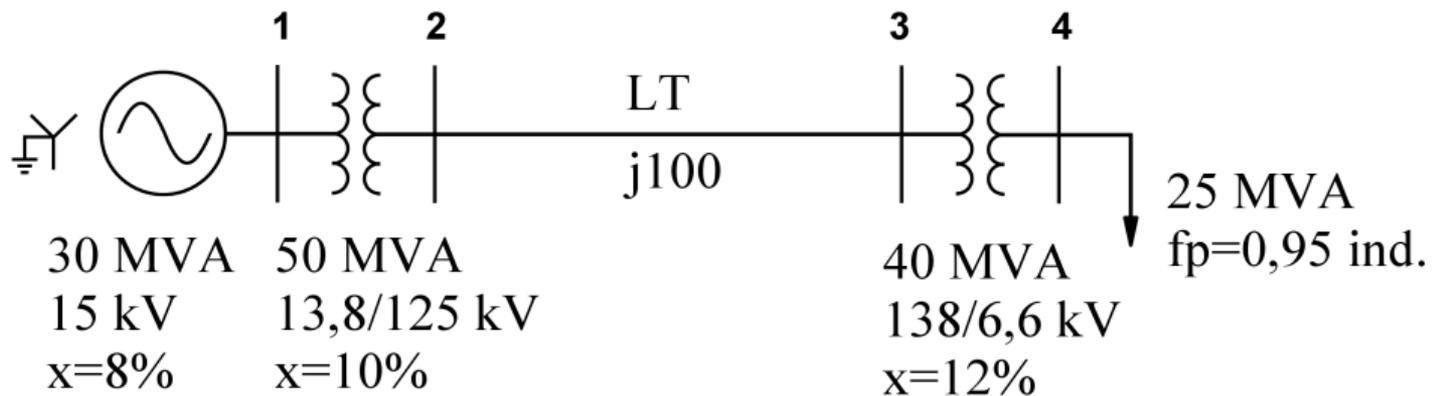


Modelo Final

Mudança de Base

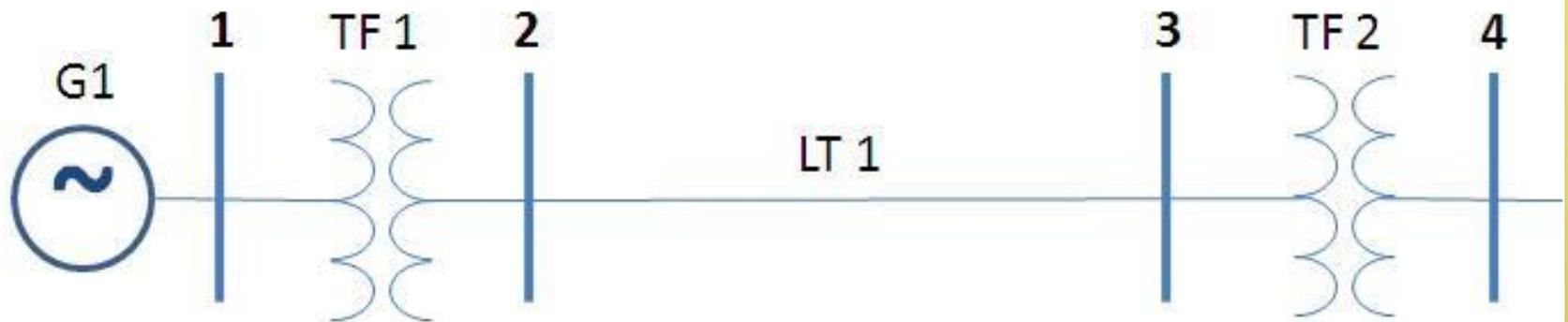
Exercício 5:

Considerando, no sistema abaixo, que a potência-base é 50 MVA e que a tensão base na barra 1 é 15 kV, converta todas as impedâncias para pu, nas bases do sistema.



Eliminação de transformadores

Exercício 6



Equipamento	Tensão nominal	Potência nominal	Reatância [pu]	Tensão de base	Potência de base
G1	13,8 kV	40 MVA	0.10	13,8 kV	40 MVA
TF 1	13,8 / 138 kV	25 MVA	0.10	13,8 / 138 kV	25 MVA
TF 2	138 / 13,8 kV	25 MVA	0.10	138 / 13,8 kV	25 MVA
LT 1	138 kV	-	0.05	138 kV	100 MVA

Qual o valor da corrente de curto-circuito trifásico na barra 4, considerando $S_b = 100$ MVA