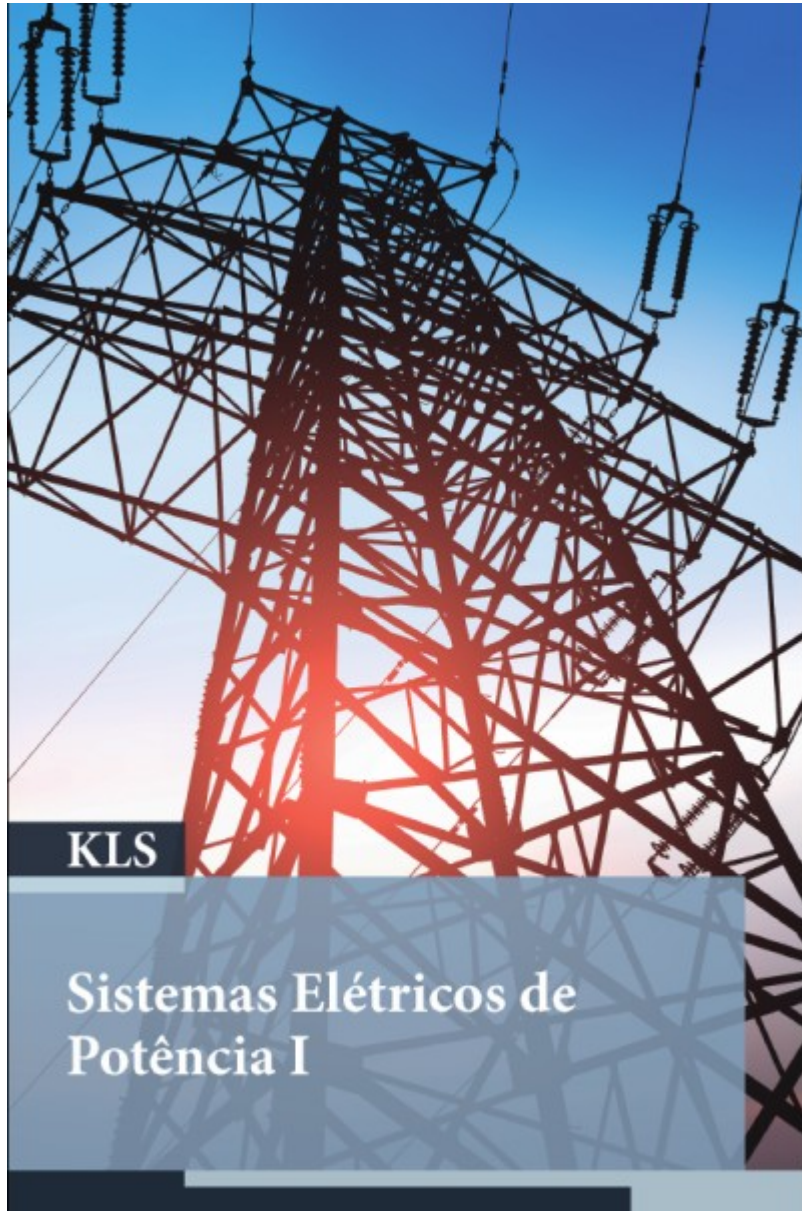


Revisão de alguns tópicos de SEP I

Sistemas Elétricos de Potência II

Livro-texto SEP I



SILVA, RS. Sistemas Elétricos de Potência I. 2019. ISBN 978-85-522-1460-1

Subsistemas e diagrama unifilar

Figura 1.2 | Subsistemas do sistema elétrico de potência

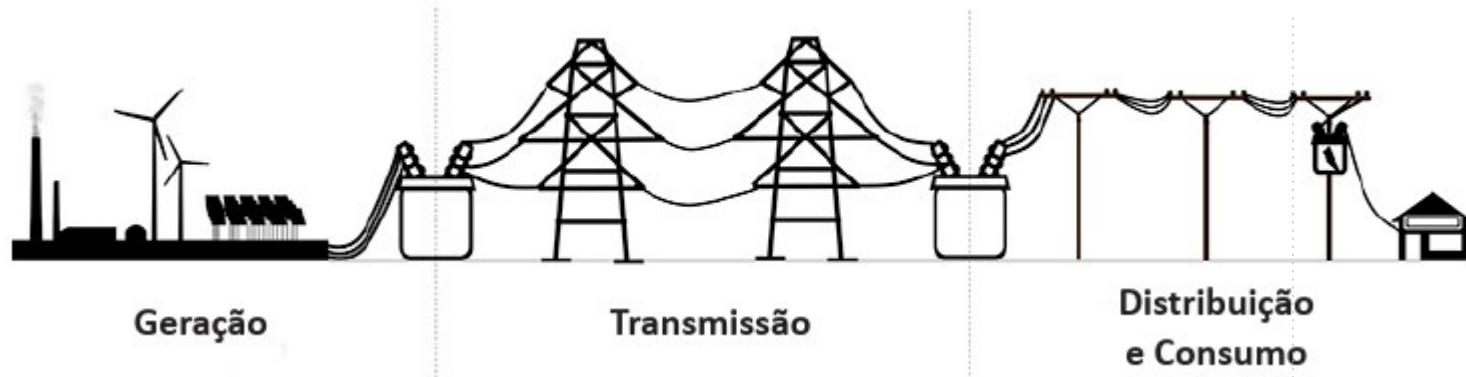
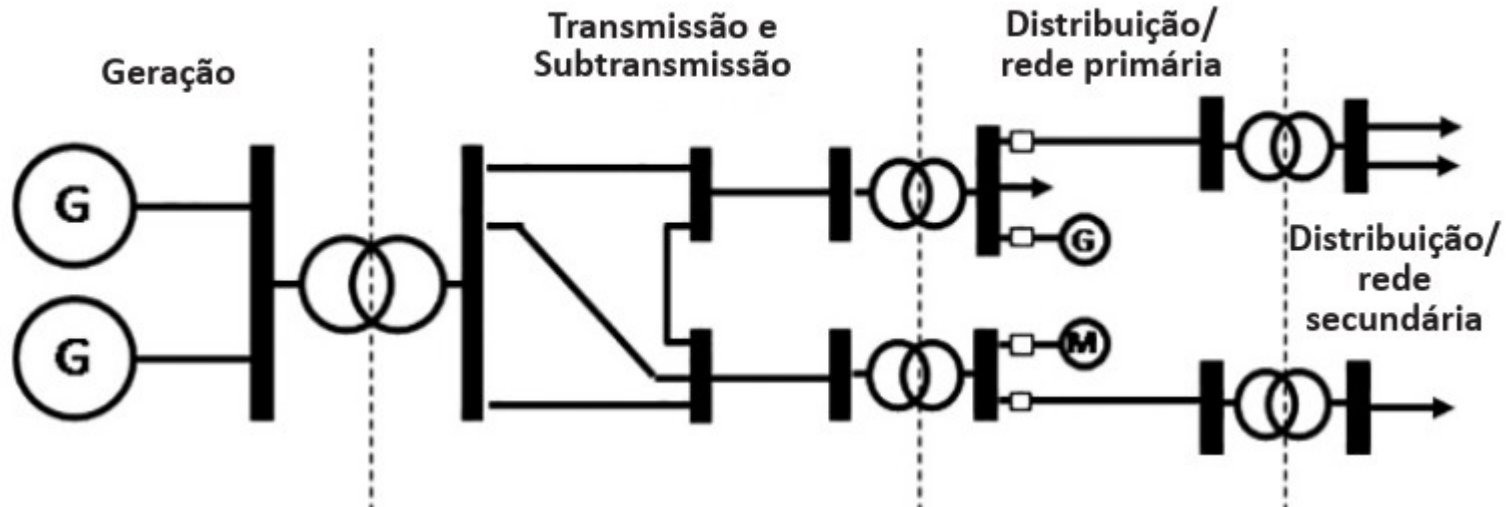
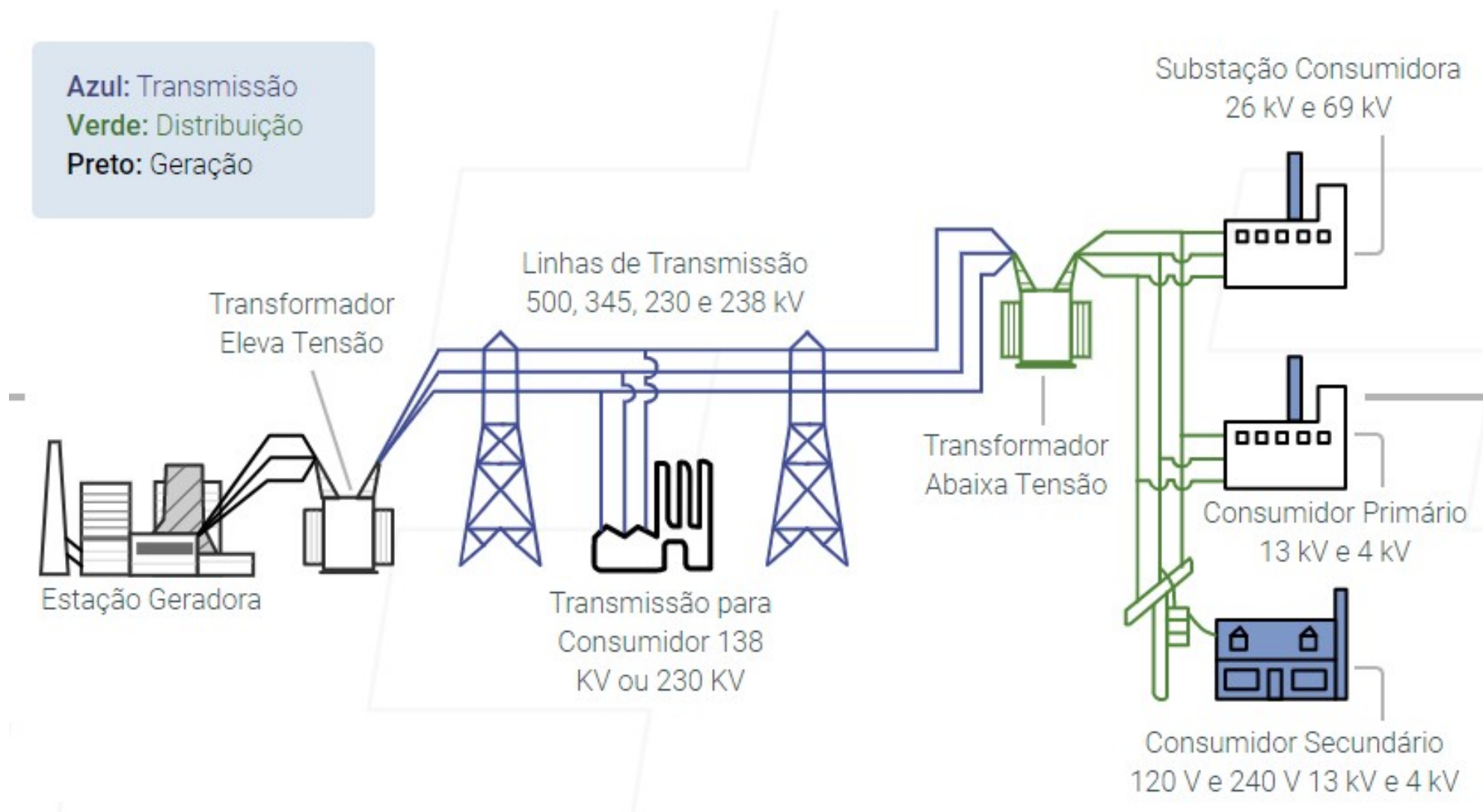


Figura 1.3 | Diagrama unifilar de um sistema elétrico de potência

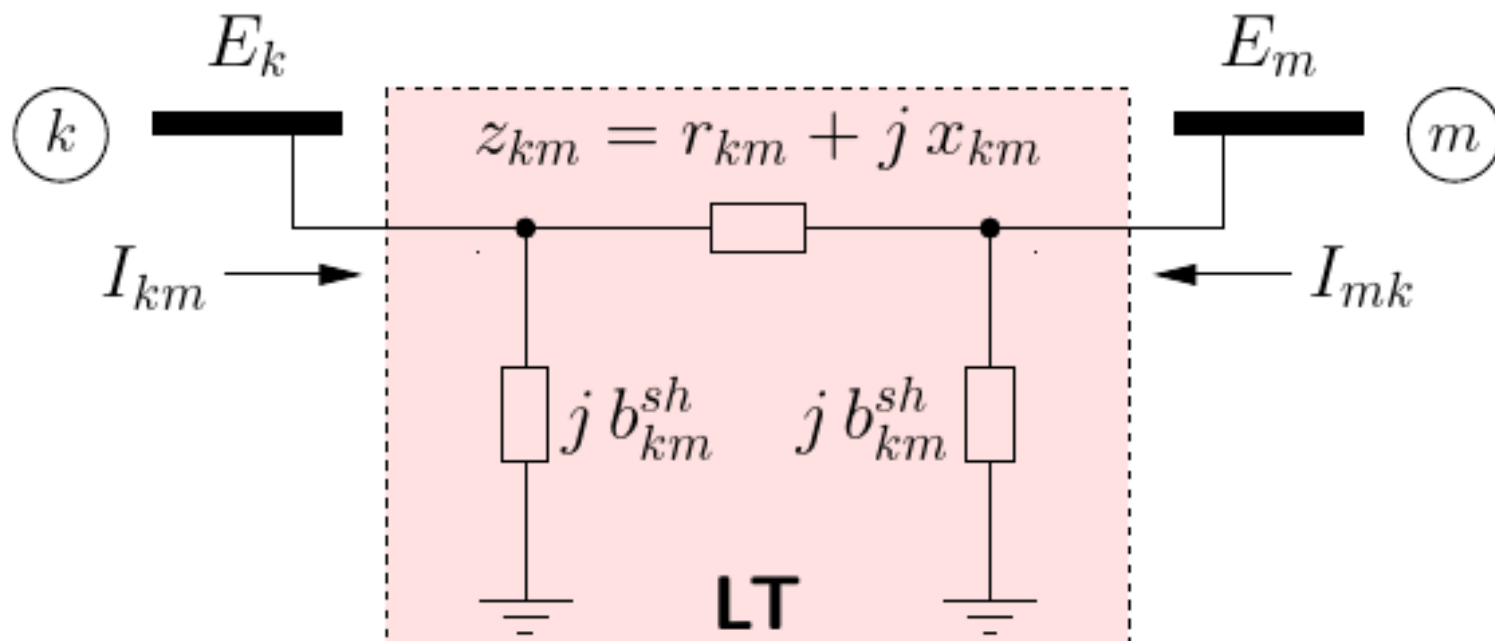


Geração, transmissão, distribuição



Fonte: <https://energes.com.br>

Representação da LT



Modelo π
equivalente

resistência série

$$r_{km} \quad (\geq 0)$$

reatância série

$$x_{km} \quad (\geq 0) \quad \textbf{(indutivo)}$$

susceptância shunt

$$b_{km}^{sh} \quad (\geq 0) \quad \textbf{(capacitivo)}$$

impedância série

$$z_{km} = r_{km} + jx_{km}$$

admitância série

$$y_{km} = \frac{1}{z_{km}} = g_{km} + jb_{km} = \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} + j \frac{-x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2}$$

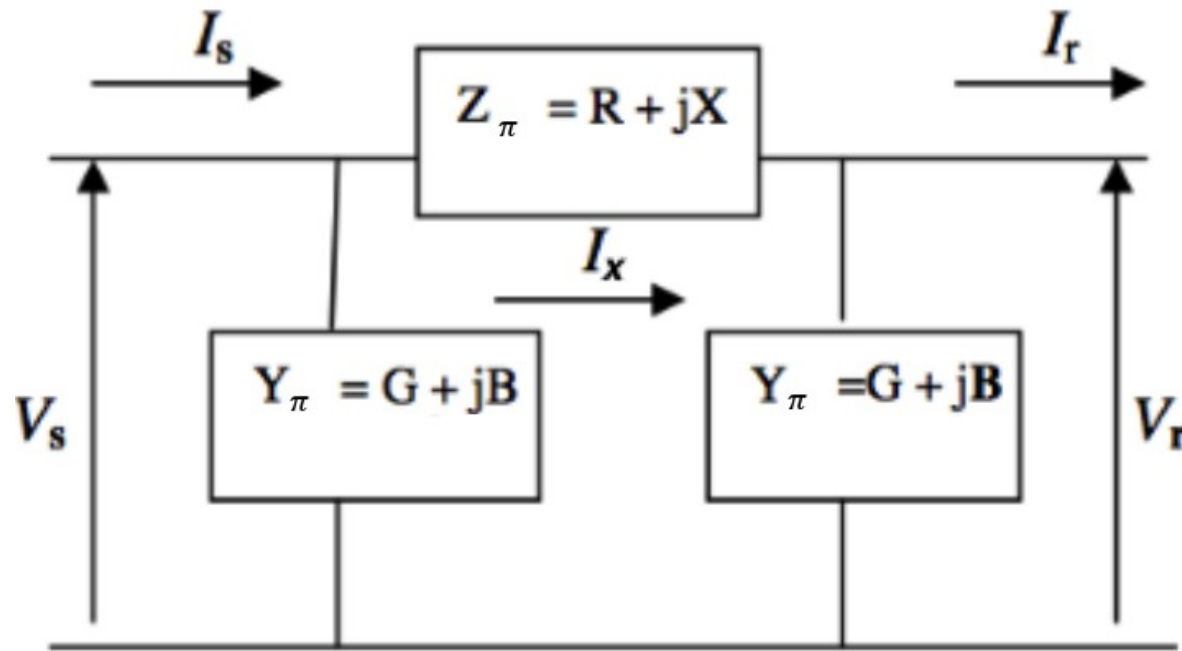
condutância série

$$g_{km} \quad (\geq 0)$$

susceptância série

$$b_{km} \quad (\leq 0) \quad \textbf{(indutivo)}$$

Algumas grandezas


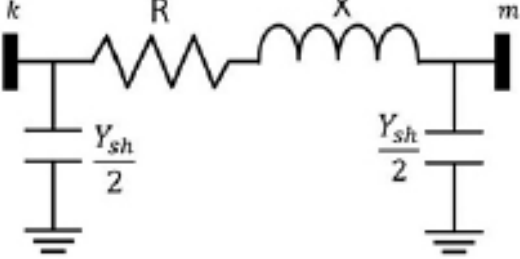
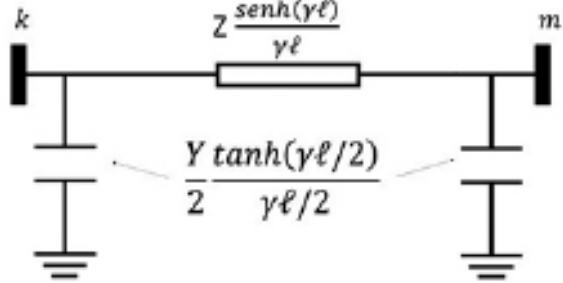


- R e X : resistância e reatância em série (ohm (Ω))
- Z_π : a impedância em série (ohm (Ω))
- G e B : condutância e susceptância shunt (S, \mathfrak{U} , ou Ω^{-1})
- Y_π : admitância em derivação (siemens (S), mho (\mathfrak{U}), ou recíproca da impedância (Ω^{-1}))

Obs: “Shunt” = em paralelo ou em derivação

Modelos de linhas

Quadro 1.3 | Modelo de linhas de transmissão no modelo π

Modelo de linhas curtas	Modelo de linhas médias	Modelos de linhas longas
		
Comprimento até 80km	Comprimento entre 80 e 240 km	Comprimento acima de 240 km

- $Y = G + jB$: a condutância (G) shunt geralmente é desprezível
- Em linhas curtas a susceptância (B) shunt também é desprezível
- Em linhas longas usa-se: Z em Ω/km , Y em S/km

l = comprimento da linha

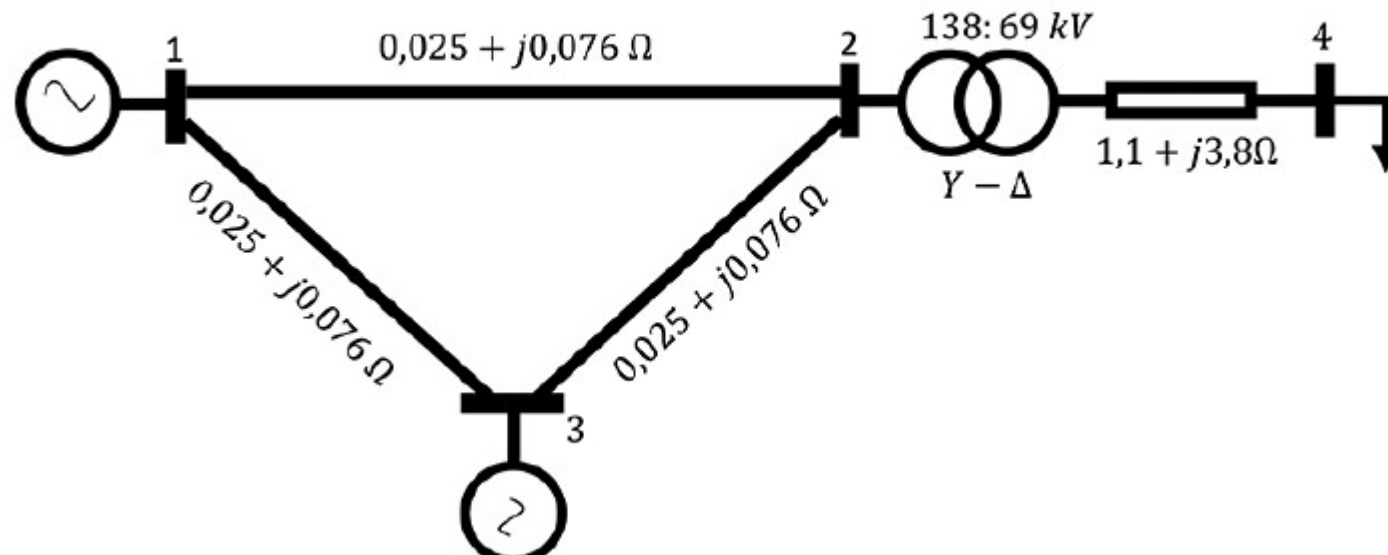
γ (gama) = constante de propagação da linha

Representação nas formas tabela e diagrama

Quadro 1.2 | Dados de entrada da rede teste

Barra início	Barra fim	R (Ω / km)	X (Ω / km)	Yshunt (S / km)	Comprimento (km)	Tipo
2	4	1,1	3,8	0	-	Trafo 138/69 kV
1	2	0,025	0,076	5×10^4	150	Linha 138 kV
2	3	0,025	0,076	5×10^4	100	Linha 138 kV
1	3	0,025	0,076	5×10^4	100	Linha 138 kV

Figura 1.6 | Diagrama unifilar da rede gerada pelo software



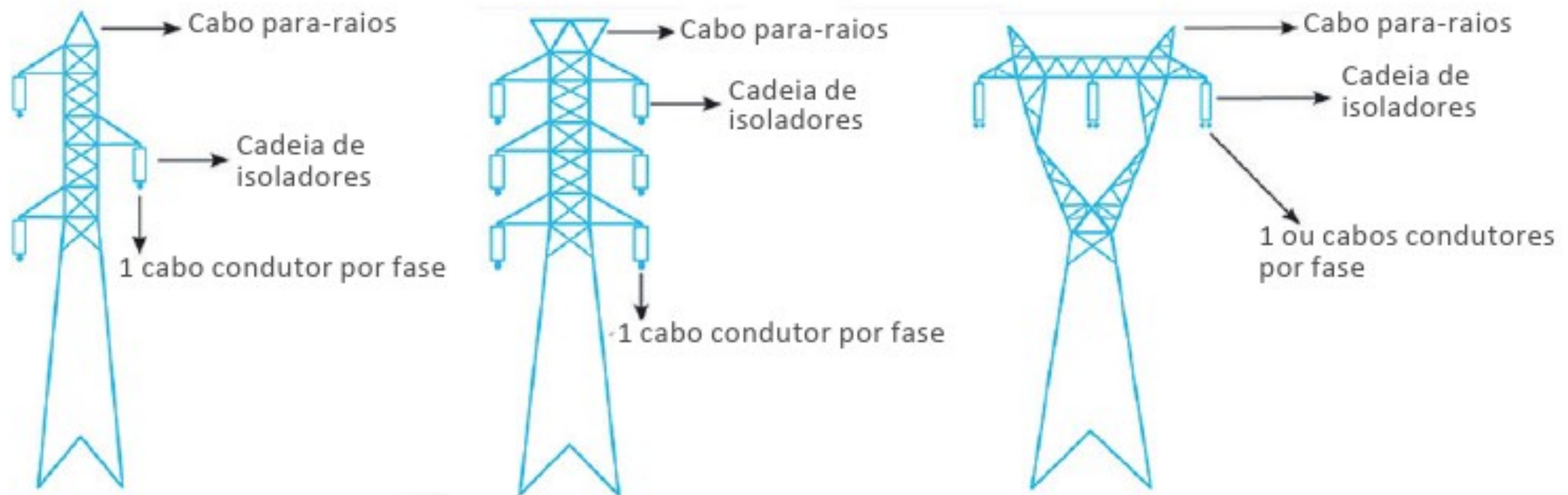
Principais equipamentos

Dentre os principais equipamentos existentes nos SEPs, podemos destacar (MAMEDE FILHO, 2015):

- As linhas de transmissão e distribuição de energia, e equipamentos associados
- Os transformadores de potência
- Os bancos de capacitores e reguladores
- Transformadores de instrumentação
- Equipamentos de proteção (reles, disjuntores, religadores, fusíveis e chaves)

Configurações típicas de torres

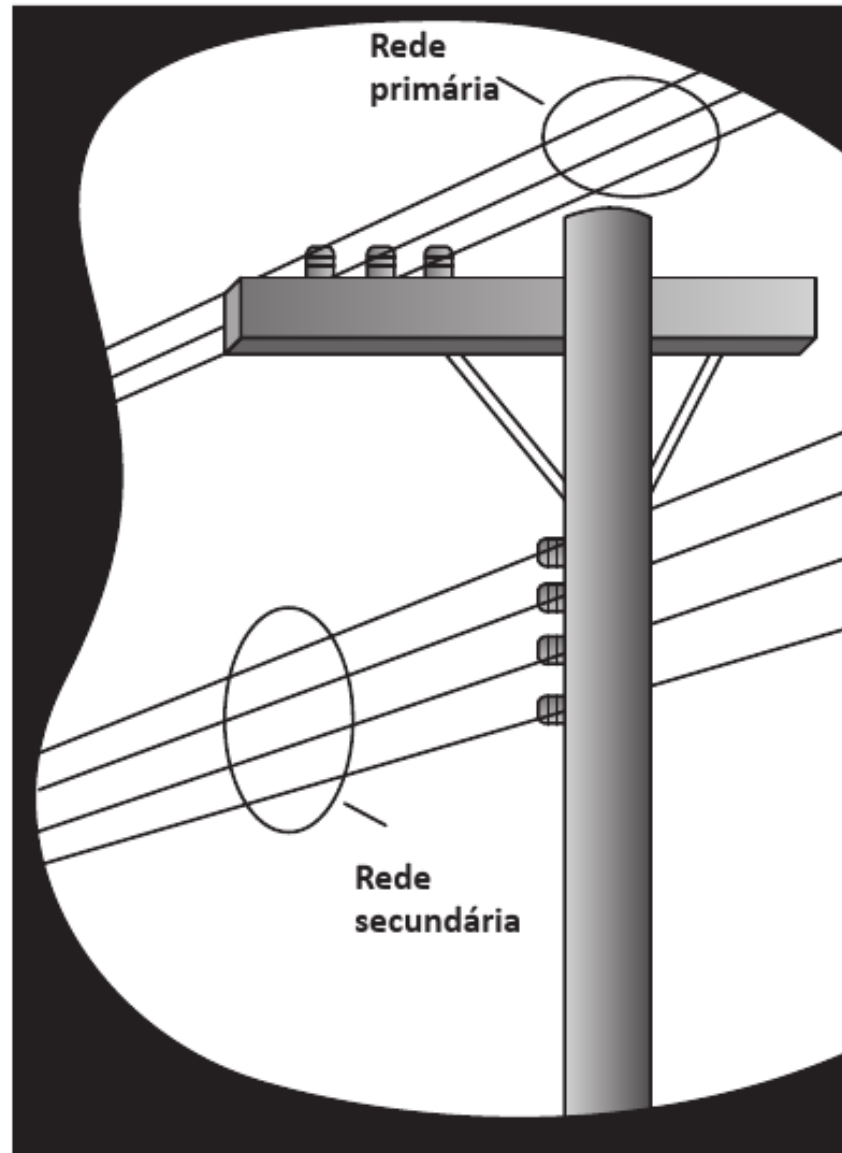
Figura 1.7 | Configurações típicas de torres de transmissão de energia elétrica (a) triangular (b) vertical e (c) horizontal



Fonte: adaptada de Pinto (2018, [s.p.]).

Redes primária e secundária

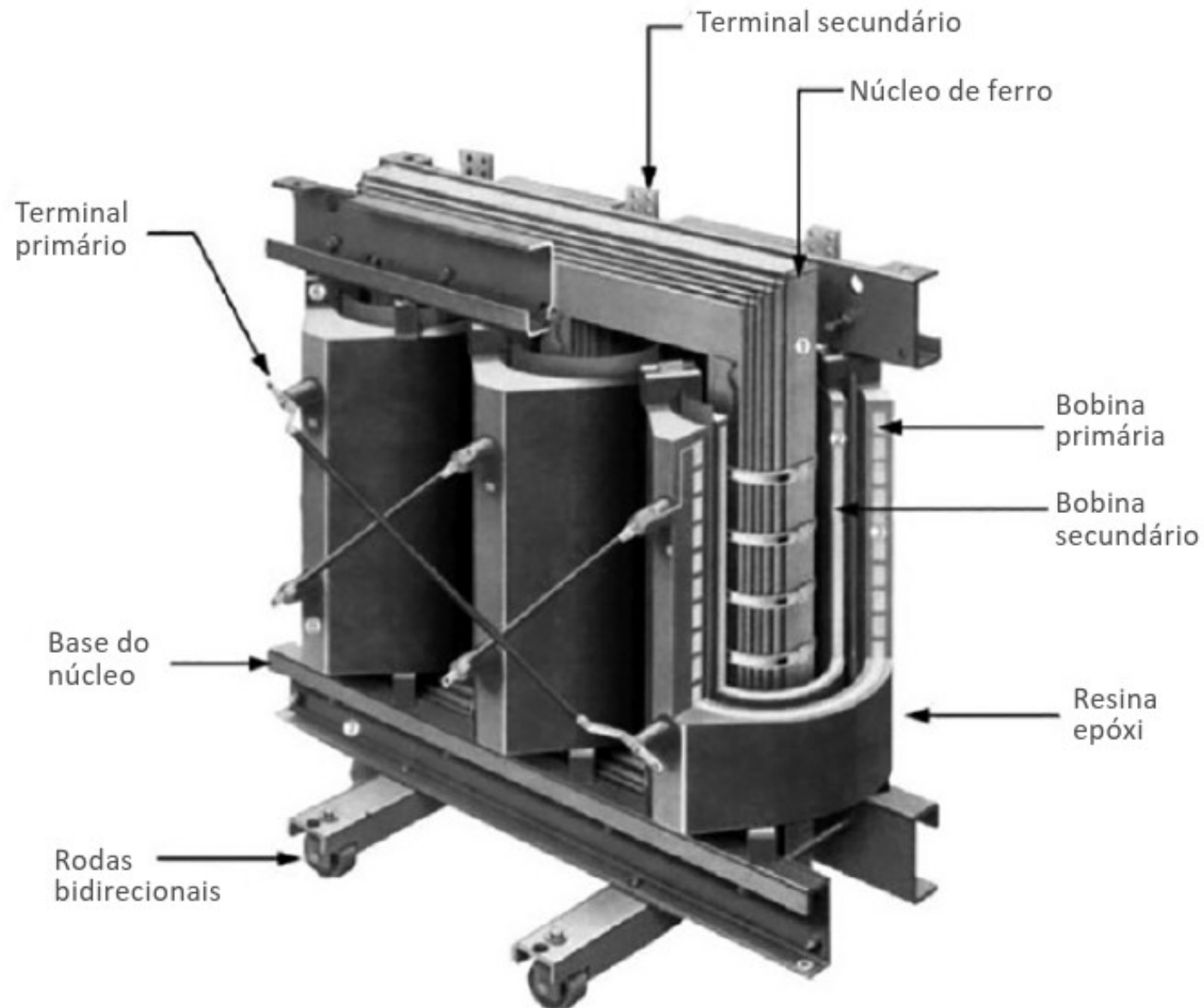
Figura 1.9 | Localização da rede primária e secundária em um poste



Fonte: Gedra, Barros e Borelli (2014, p. 29).

Transormador trifásico

Figura 1.10 | Transformador de potência trifásico – aspectos construtivos



Detalhe do ventilador

LV terminals

Normal arrangement:
Top, rear
Special version: Bottom,
available on request at
extra charge

HV terminals

Variable arrangements,
for optimal station design.
HV tapping links on low-
voltage side for adjust-
ment to system con-
ditions, reconnectable
in de-energized state

Cross-flow fans

Permitting a 50% in-
crease in the rated power

Temperature monitoring

By PTC thermistor detec-
tors in the LV winding

Paint finish on steel parts

Multiple coating,
RAL 5009. On request:
Two-component varnish
or hot-dip galvanizing
(for particularly aggressive
environments)

Ambient class E2

Climatic category C2
(If the transformer is in-
stalled outdoors, degree
of protection IP 23 must
be assured)

Fire class F1

Three-leg core

Made of grain-oriented,
low-loss electrolami-
nations insulated on
both sides

Resilient spacers

To insulate core and
windings from mechan-
ical vibrations, result-
ing in low noise emissions

HV winding

Consisting of vacuum-
potted single foil-type
aluminum coils.
See enlarged detail
in Fig. 50

LV winding

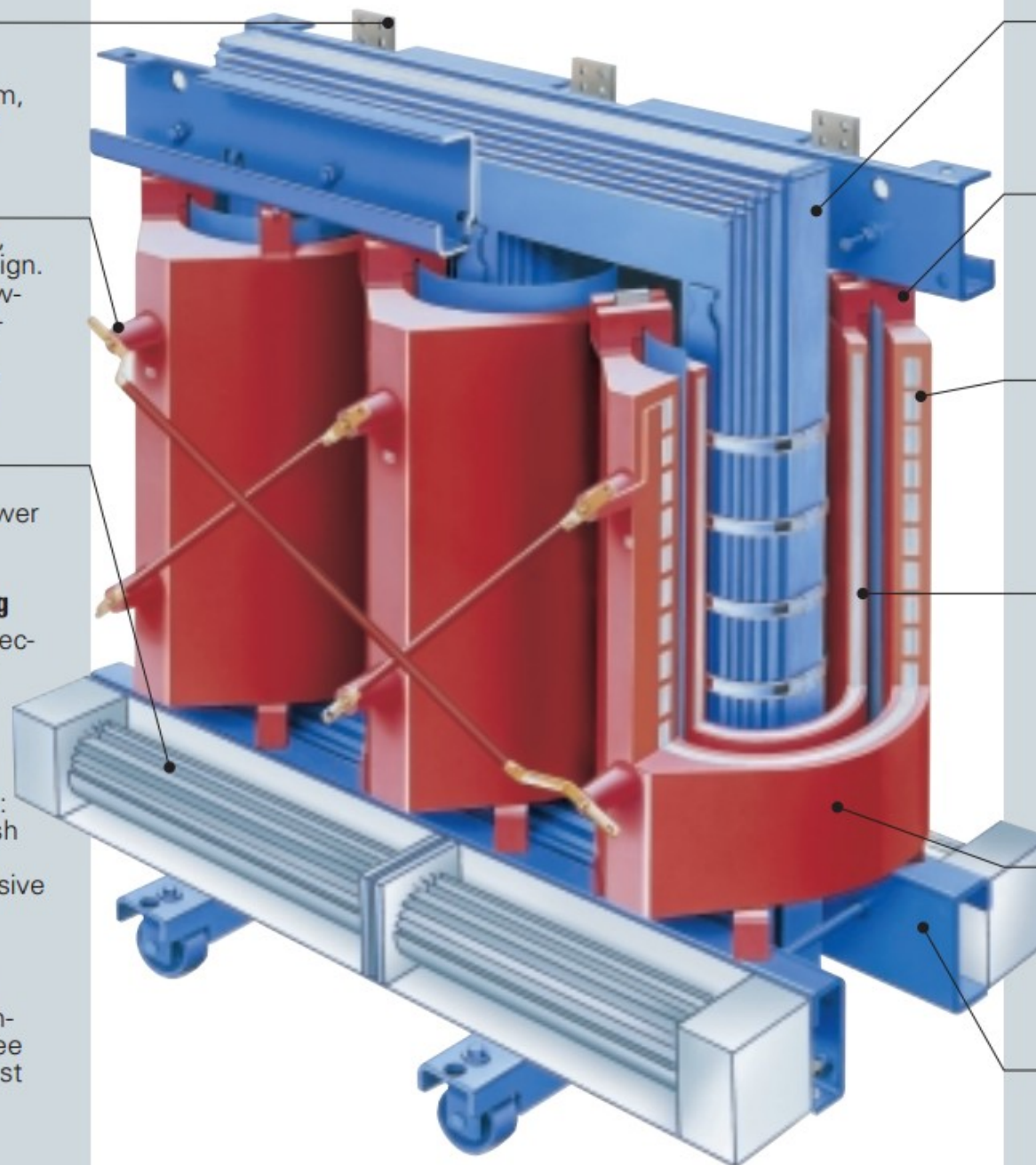
Made of aluminum strip.
Turns firmly glued
together by means of
insulating sheet wrapper
material

Insulation: Mixture of epoxy resin and quartz powder

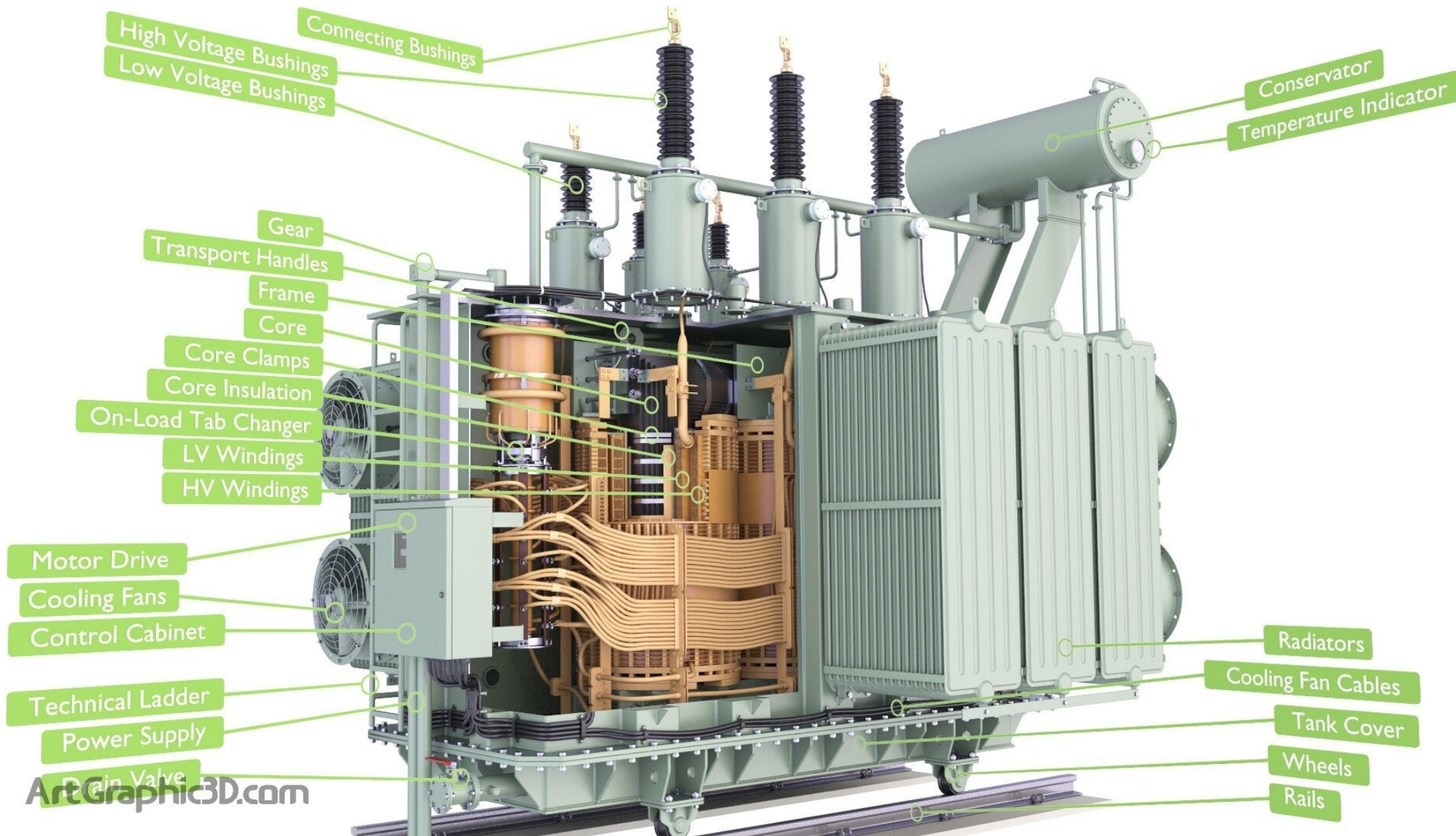
Makes the transformer
maintenance-free, mois-
ture-proof, tropicalized,
flame-resistant and self-
extinguishing

Clamping frame and truck

Rollers can be swung
around for lengthways or
sideways travel

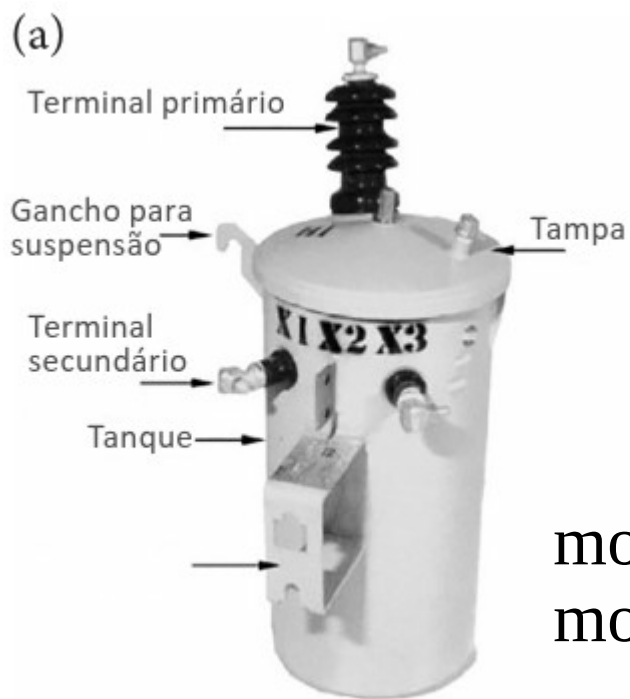
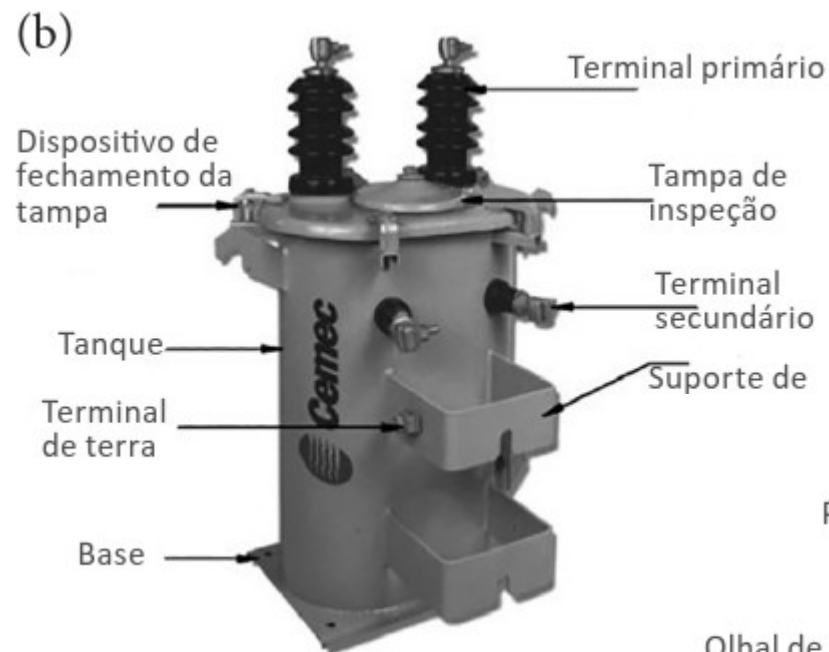


Transformador a óleo

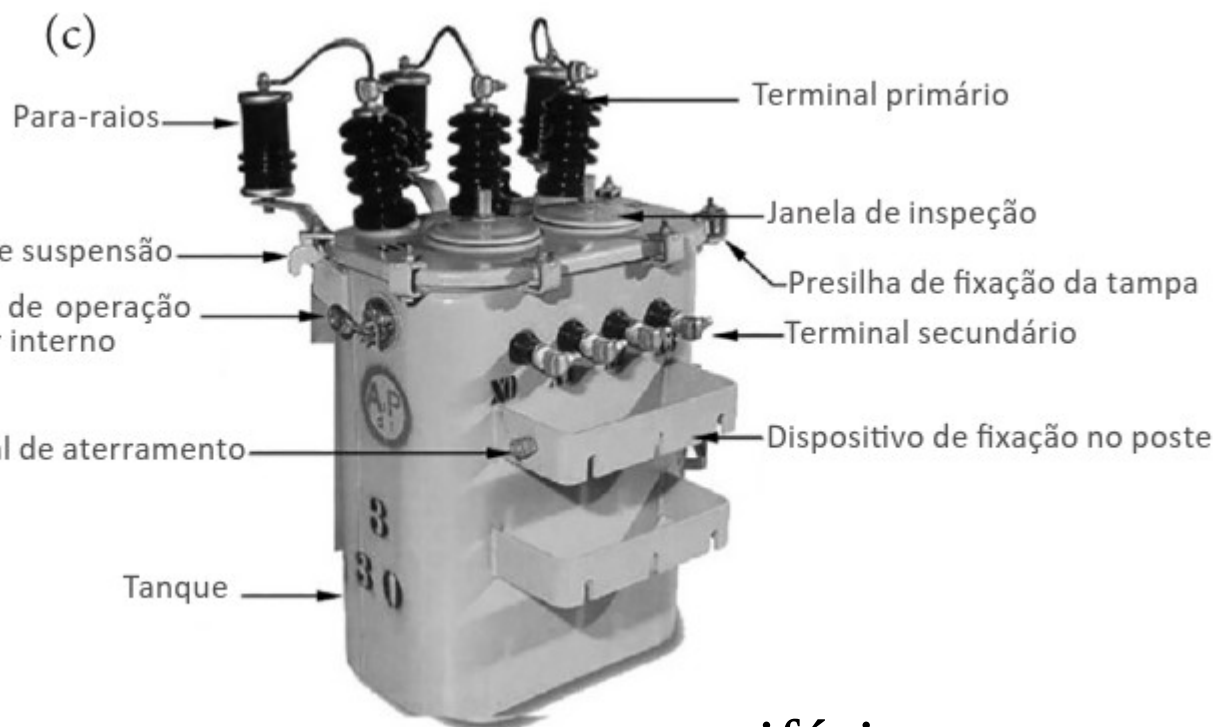


Transformadores de distribuição

bifásico



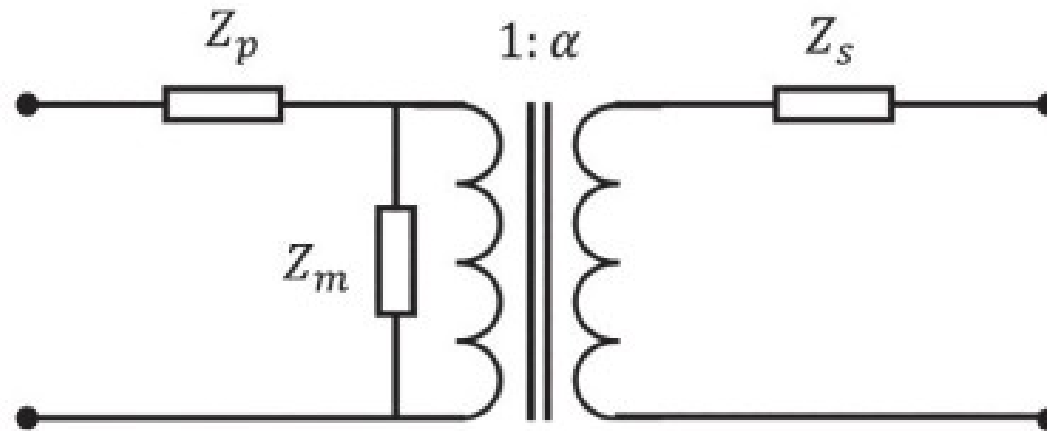
monofásico ou monobucha



trifásico

Circuito equivalente do transformador

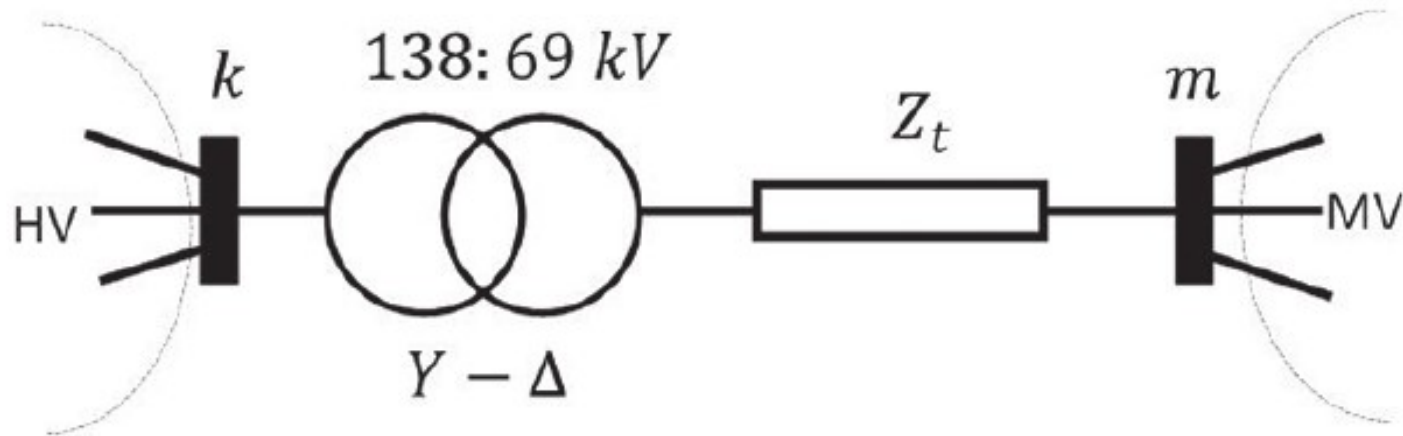
Figura 1.13 | Circuito equivalente do transformador



- Z_p e Z_s : impedâncias dos enrolamentos do primário e do secundário
- Z_m : impedância de magnetização (geralmente pode ser desprezada)
- $1:\alpha$: relação de transformação

Representação de um transformador

Figura 1.12 | Modelo unifilar do transformador de potência



- Representação de um transformador em um sistema elétrico equilibrado (amplitude e desfasamento das 3 fases, idênticas)
- Z_t representa a impedância do transformador

Impedância refletida

Figura 1.15 | Circuito equivalente do transformador como uma impedância em série com o transformador ideal

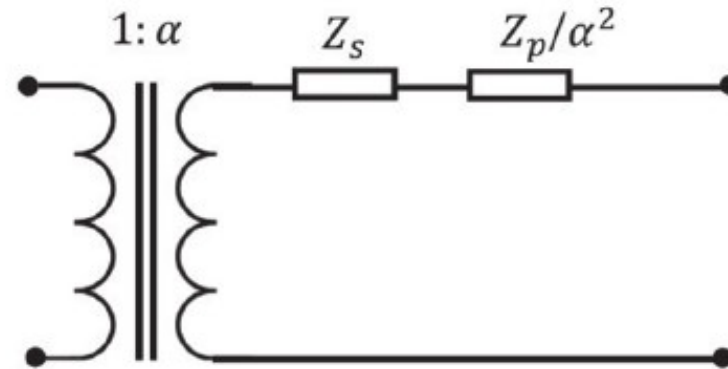
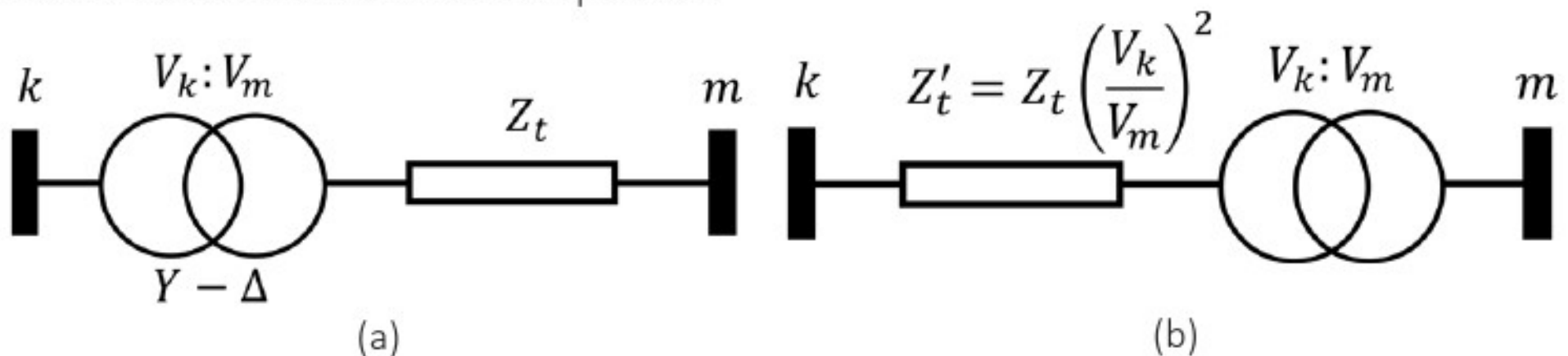
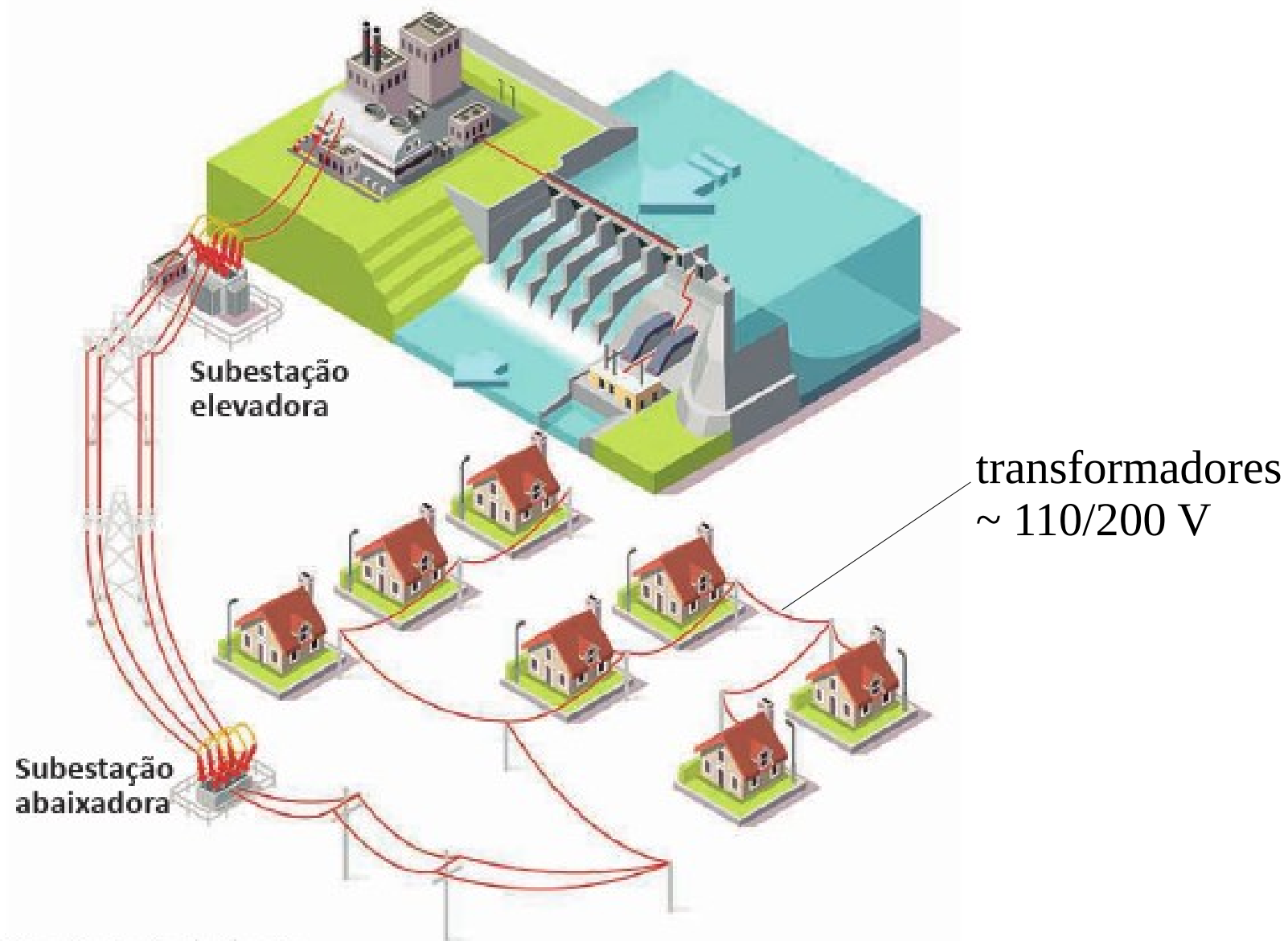


Figura 2.2 | Modelo do transformador (a) com impedância total no secundário (b) com a impedância do secundário refletida no primário











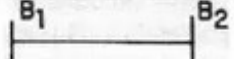

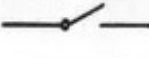

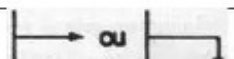


Localização das subestações

Figura 1.18 | Localização das subestações de energia em um sistema elétrico de potência

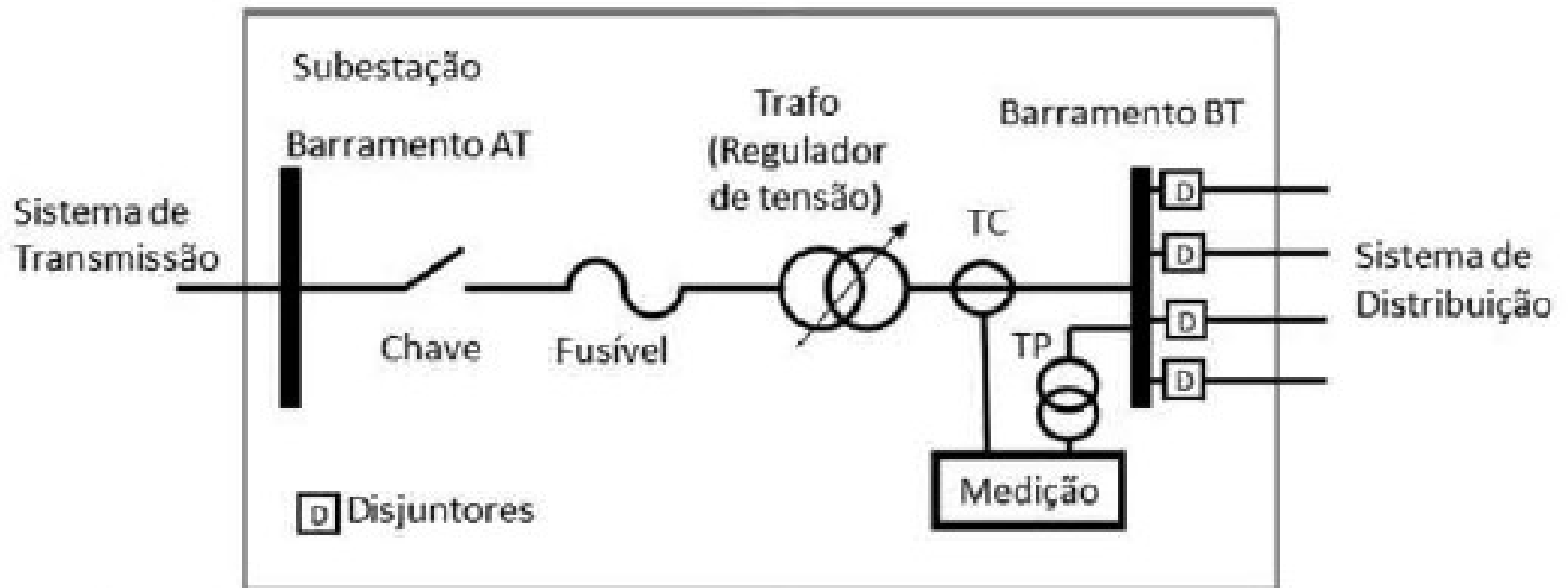


Alguns símbolos utilizados em unifilares

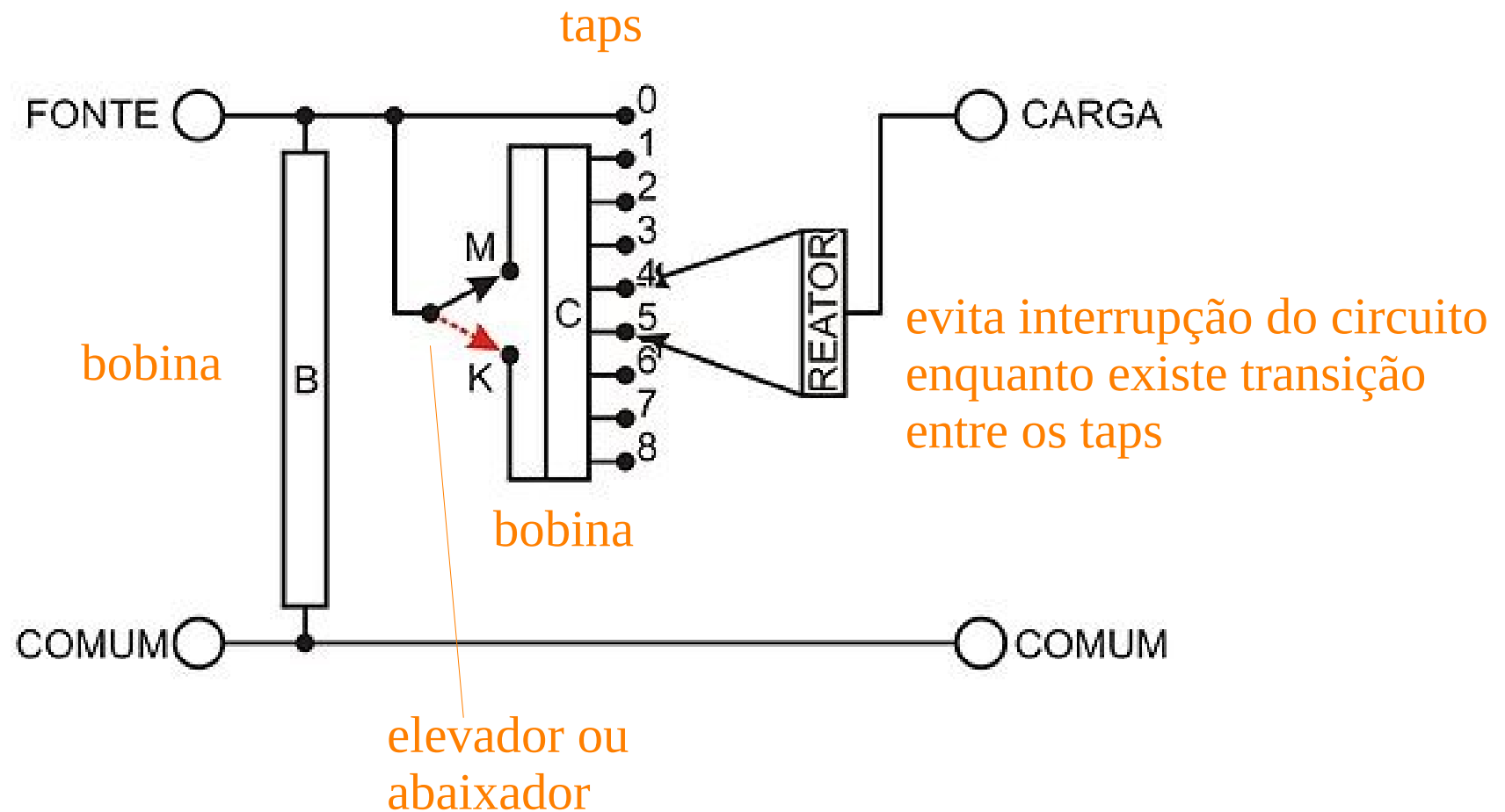
Símbolos utilizados em diagramas unifilares	
	- MÁQUINA ROTATIVA(SÍMBOLO BÁSICO).
	- GERADOR DE c.a..
	- MOTOR ELÉTRICO.
	- BARRA (BARRAMENTO) NÚMERO B .
	- TRANSFORMADOR DE 2 ENROLAMENTOS.
	- TRANSFORMADOR DE 3 ENROLAMENTOS (NOTAÇÃO ALEMÃ).
	- INDICATIVO DE LIGAÇÃO EM ESTRELA, COM NEUTRO ISOLADO.
	- INDICATIVO DE LIGAÇÃO EM ESTRELA, COM NEUTRO SOLIDAMENTE ATERRADO.
	- INDICATIVO DE LIGAÇÃO EM ESTRELA, COM NEUTRO ATERRADO ATRAVÉS DA IMPEDÂNCIA Z_N .
	- INDICATIVO DE LIGAÇÃO
	- LINHA ENTRE BARRAMENTOS DE NÚMERO B_1 E B_2 .
	- DISJUNTOR A AR.
	- CHAVE SECCIONADORA.
	- TRANSFORMADOR DE CORRENTE (TC).
	- CARGA.

Esquema básico de uma subestação

Figura 1.19 | Esquema básico de uma subestação e seus componentes



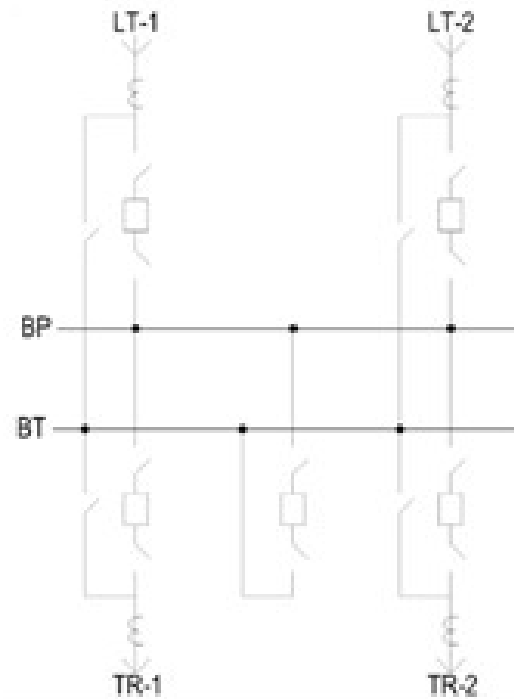
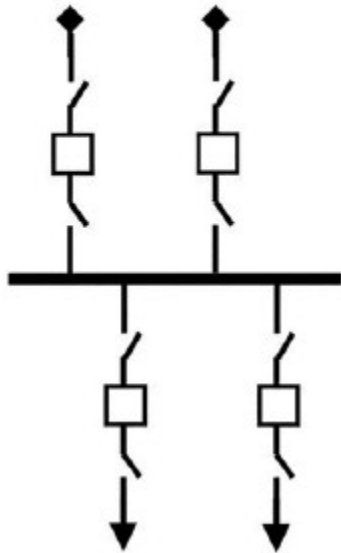
Regulador de tensão de média tensão



Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Regulador_de_tens%C3%A3o_de_m%C3%A9dia_tens%C3%A3o

Alguns barramentos

Figura 1.20 | Esquema do arranjo de barra simples



A barra de transferência é utilizada para melhorar o processo de manutenção, de modo que um disjuntor possa ser retirado de serviço para a manutenção

Fonte: pronextengenharia.com.br

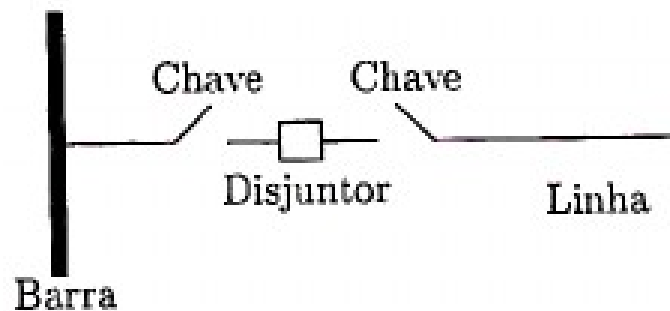


Fig. 3.17. Barramento tipo simples [5].

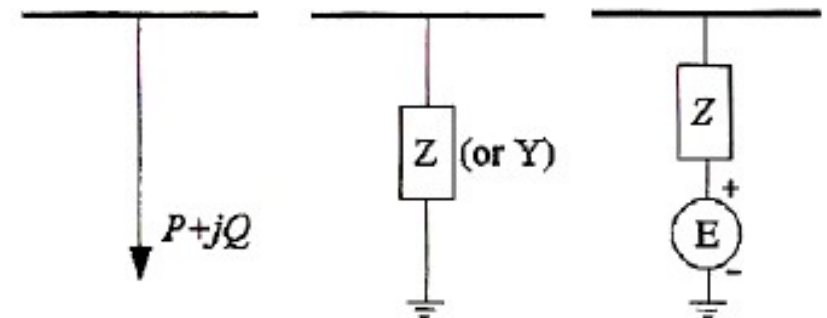


Fig. 3.19. Modelos de cargas.

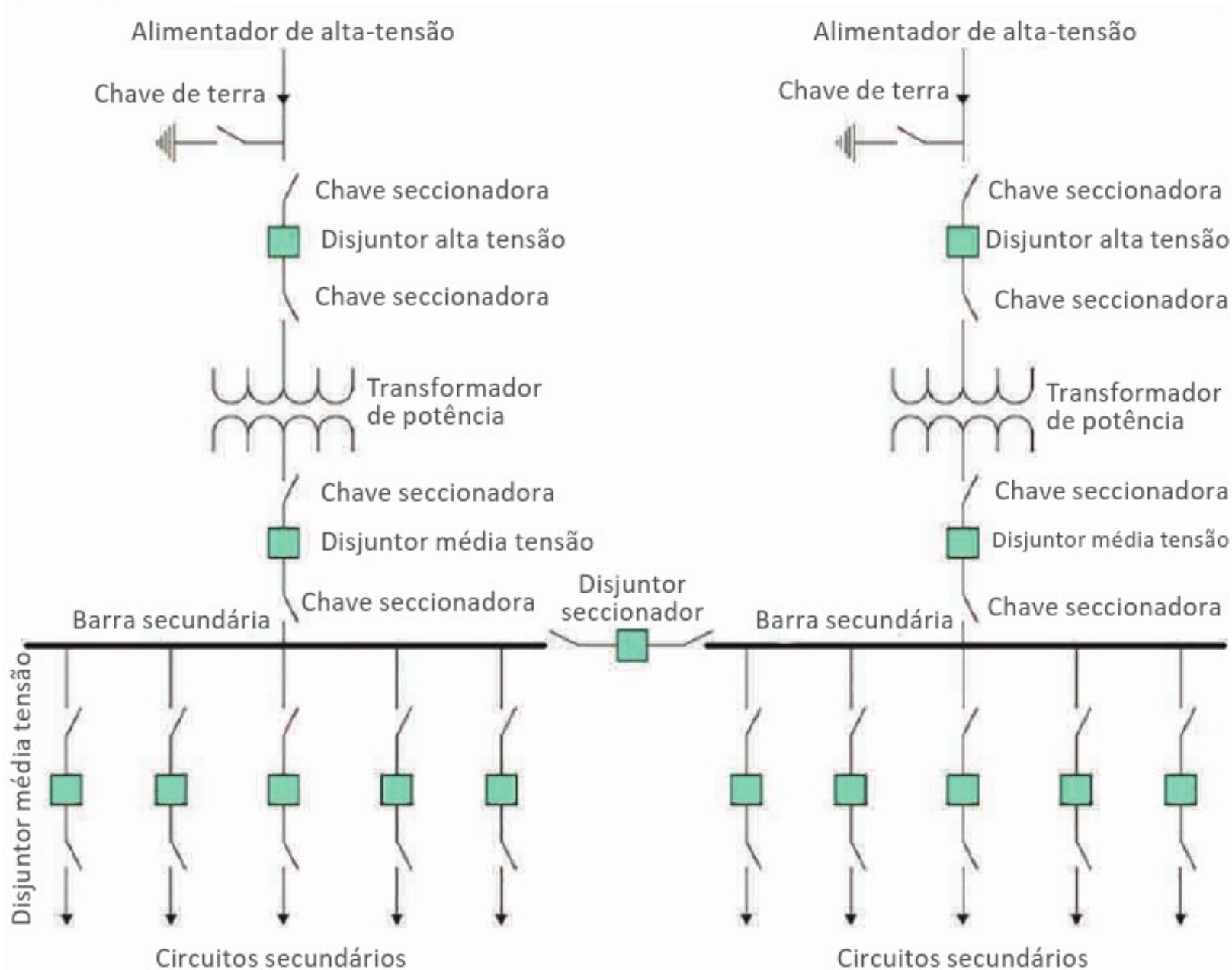
Exemplos de barramentos



Fontes:
distransubstations.com
eepower.com

Esquema de ligação de subestação

Figura 1.27 | Esquema de ligação da subestação utilizando barramento simples seccionado na barra secundária



Representação gerador e transformador

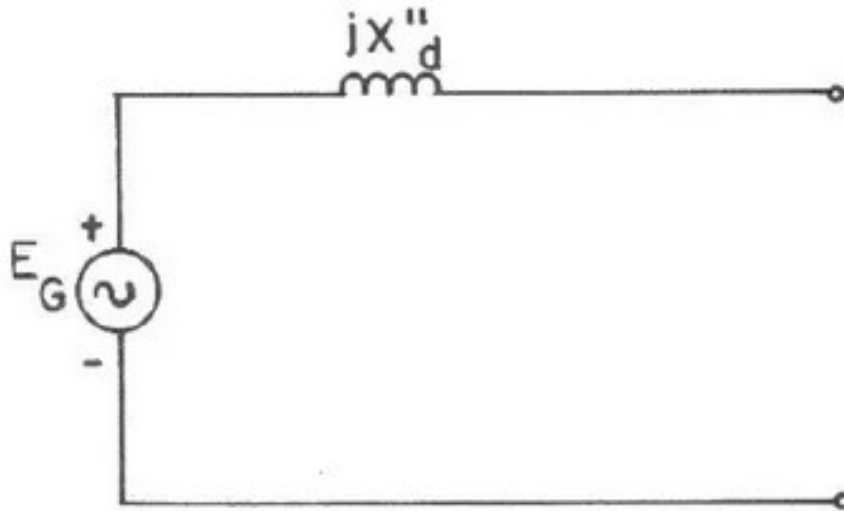
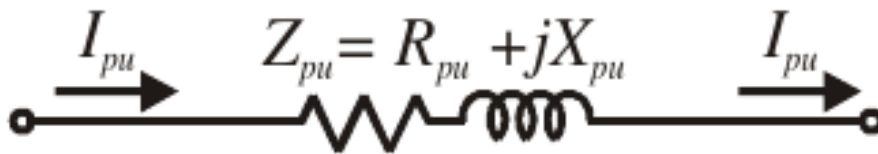


Figura 4.4. Representação de gerador c.a..

representação
do gerador



relação de transformação 1:1

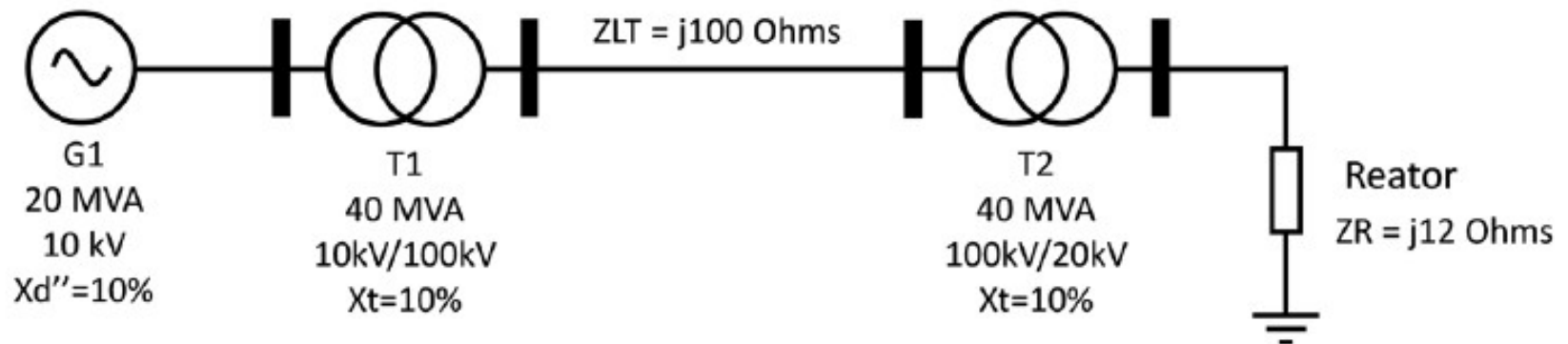
representação do
transformador em pu



Fig. 3.10. Modelo do transformador monofásico em pu.

Sistema elétrico alimentando um reator

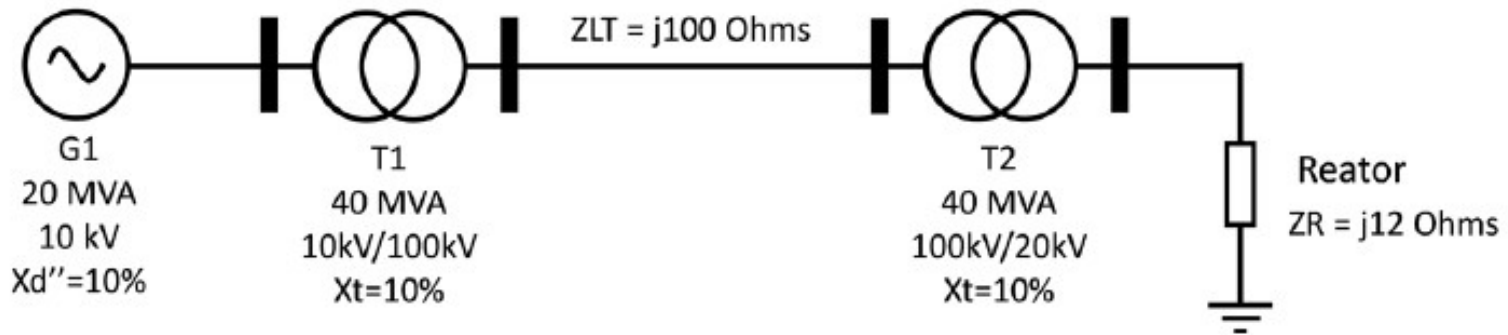
Figura 2.1 | Sistema elétrico alimentando um reator



- X''_d = impedância do gerador
- X_t = impedância do transformador
- pu em valor percentual = valor pu x 100%

Sistema por unidade (pu)

Figura 2.1 | Sistema elétrico alimentando um reator



$$I_{base} [A] = \frac{S_{base} [kVA]_{3\phi}}{\sqrt{3} V_{base} [kV]_{LL}}$$

$$Z_{base} [\Omega] = \frac{(V_{base} [kV]_{LL})^2}{S_{base} [MVA]_{3\phi}}$$

$$Valor_{pu} = \frac{Valor_{real}}{Valor_{Base}}$$

$$Valor_{pu}^{Base2} = Valor_{pu}^{Base1} \frac{Base1}{Base2}$$

Adotados:

S_{base}

V_{base}

- É uma forma de expressar as grandezas elétricas em um circuito de forma normalizada
- LL = fase-fase, LN = fase-neutro

Exemplo 1 (p. 63 do livro-texto SEP I)

Exemplificando

(pu)

Seja um gerador de 50 MVA e 10 kV que possui uma reatância de 12%. Se esse gerador for conectado a um sistema de 100 MVA, qual será o valor da reatância do gerador em pu? (base adotada)

Resolução:

Nesse caso podemos fazer o seguinte cálculo:

$$Valor_{pu}^{Base2} = Valor_{pu}^{Base1} \frac{Base1}{Base2}$$

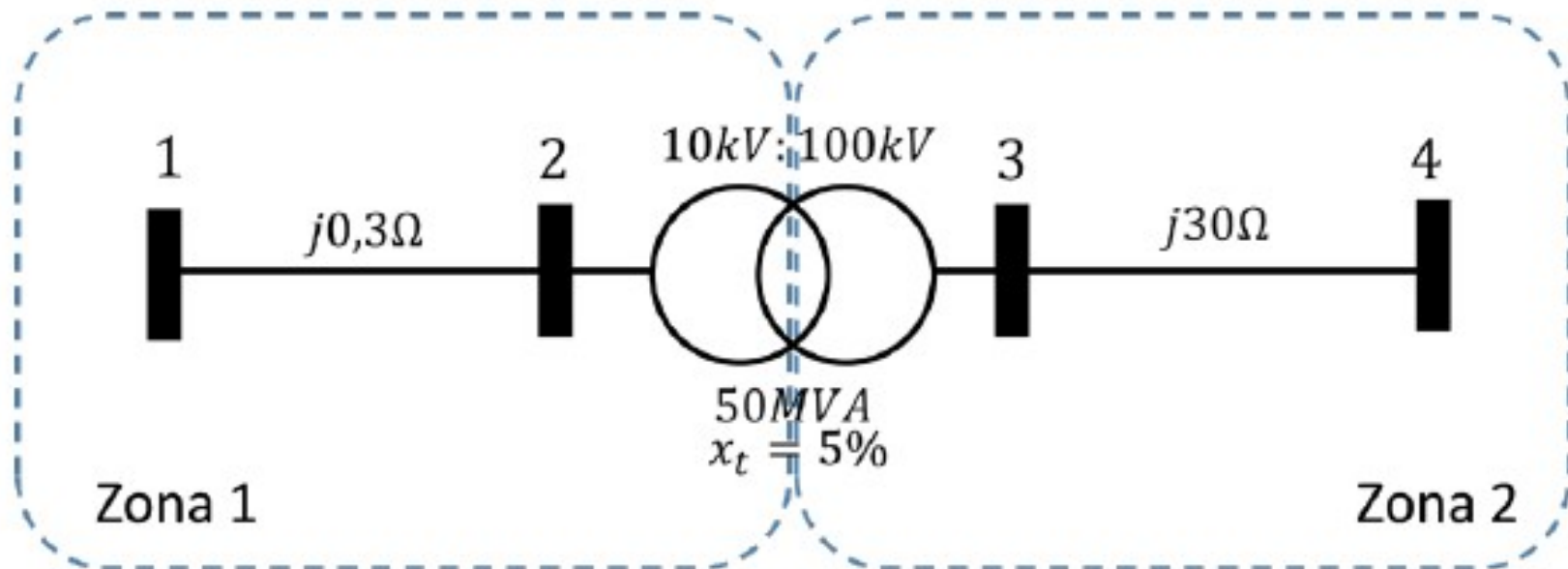
$$x_{pu}^{100MVA} = x_{pu}^{50MVA} \frac{Z_{base}^{50MVA}}{Z_{base}^{100MVA}} = x_{pu}^{50MVA} \frac{\frac{(10kV)^2}{50MVA}}{\frac{(10kV)^2}{100MVA}} = x_{pu}^{50MVA} \frac{100MVA}{50MVA}$$

Assim, temos:

$$x_{pu}^{100MVA} = 0,12 \frac{100}{50} = 0,24 \text{ pu.}$$

Exemplo 2 (p. 66 do livro-texto SEP I)

Figura 2.4 | Zonas para determinação dos valores de base



$$V_{b1} = 10kV \quad V_{b2} = 100kV$$

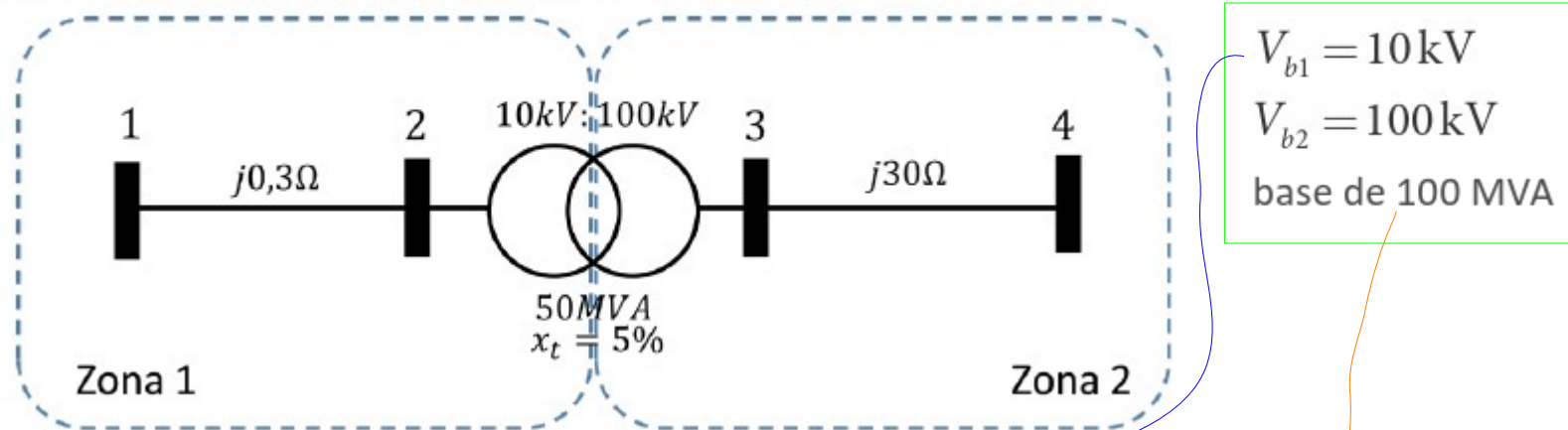
adotado, em cada zona

base de 100 MVA

adotado, para as duas zonas

Impedância de cada zona

Figura 2.4 | Zonas para determinação dos valores de base



As impedâncias de base de cada zona são dadas, então, por:

$$Z_{b1} = \frac{(V_{b1})^2}{S_b} = \frac{(10 \times 10^3)^2}{100 \times 10^6} = 1 \Omega$$

$$Z_{b2} = \frac{(V_{b2})^2}{S_b} = \frac{(100 \times 10^3)^2}{100 \times 10^6} = 100 \Omega$$

$$I_{base}[A] = \frac{S_{base}[kVA]_{3\phi}}{\sqrt{3}V_{base}[kV]_{LL}}$$

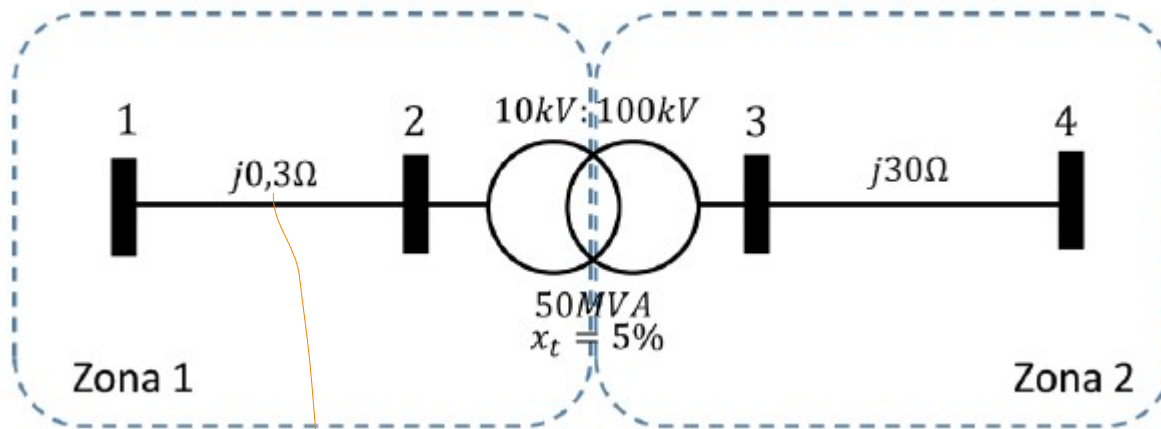
$$Z_{base}[\Omega] = \frac{(V_{base}[kV]_{LL})^2}{S_{base}[MVA]_{3\phi}}$$

$$Valor_{pu} = \frac{Valor_{real}}{Valor_{Base}}$$

$$Valor_{pu}^{Base2} = Valor_{pu}^{Base1} \frac{Base1}{Base2}$$

Impedância pu de cada linha

Figura 2.4 | Zonas para determinação dos valores de base



$V_{b1} = 10 \text{ kV}$
 $V_{b2} = 100 \text{ kV}$
 base de 100 MVA
 $Z_{b1} = 1 \Omega$
 $Z_{b2} = 100 \Omega$

As impedâncias em pu de cada linha serão:

$$z_{1-2} = \frac{j0,3\Omega}{1\Omega} = j0,3 \text{ pu} \quad z_{3-4} = \frac{j30\Omega}{100\Omega} = j0,3 \text{ pu}$$

$$I_{base} [A] = \frac{S_{base} [kVA]_{3\phi}}{\sqrt{3} V_{base} [kV]_{LL}}$$

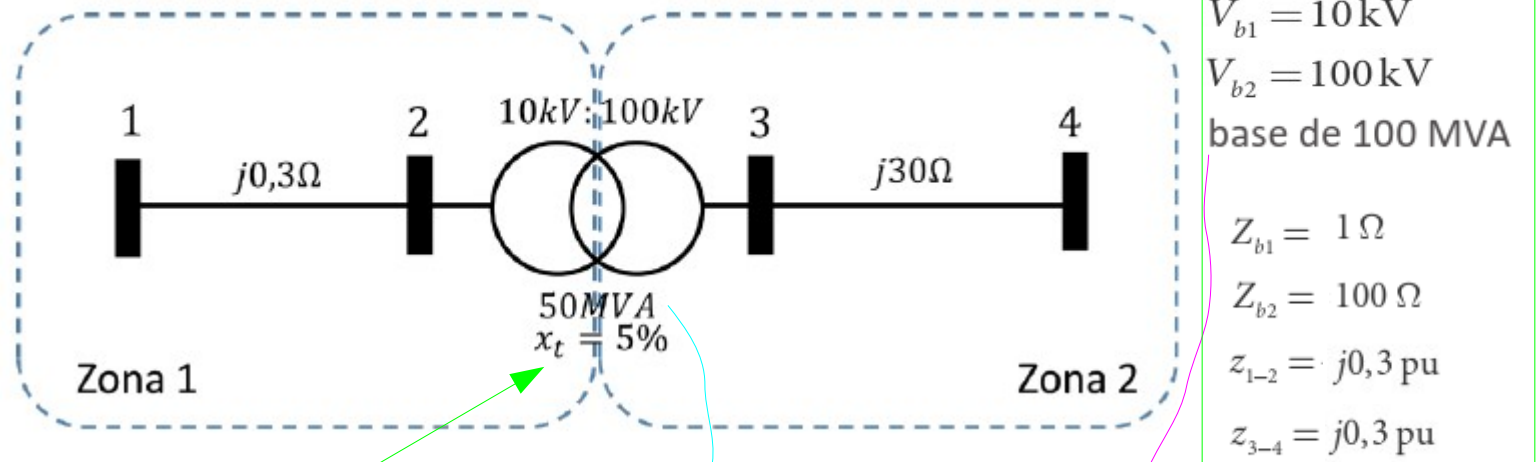
$$Z_{base} [\Omega] = \frac{(V_{base} [kV]_{LL})^2}{S_{base} [MVA]_{3\phi}}$$

$$Valor_{pu} = \frac{Valor_{real}}{Valor_{Base}}$$

$$Valor_{pu}^{Base2} = Valor_{pu}^{Base1} \frac{Base1}{Base2}$$

Mudança de base do transformador

Figura 2.4 | Zonas para determinação dos valores de base



- já está em pu → relação de transformação 1:1
- mudança da base 50 MVA para a base 100 MVA

Para o transformador, é necessário fazer uma mudança de base:

$$I_{base} [A] = \frac{S_{base} [kVA]_{3\phi}}{\sqrt{3} V_{base} [kV]_{LL}}$$

$$Z_{base} [\Omega] = \frac{(V_{base} [kV]_{LL})^2}{S_{base} [MVA]_{3\phi}}$$

$$Valor_{pu} = \frac{Valor_{real}}{Valor_{Base}}$$

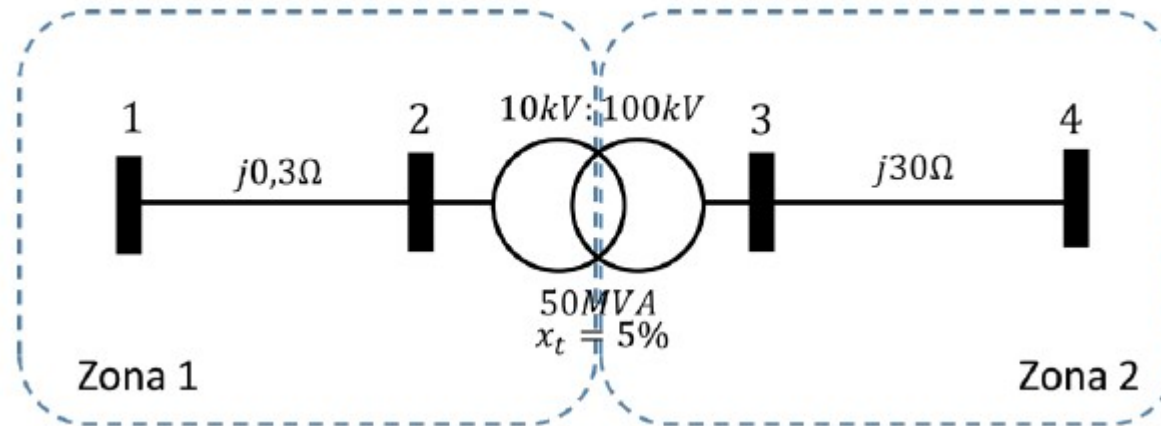
$$Valor_{pu}^{Base2} = Valor_{pu}^{Base1} \frac{Base1}{Base2}$$

$$z_{2-3} = j0,05 \frac{100}{50} = j0,1 \text{ pu}$$

Sistema equivalente

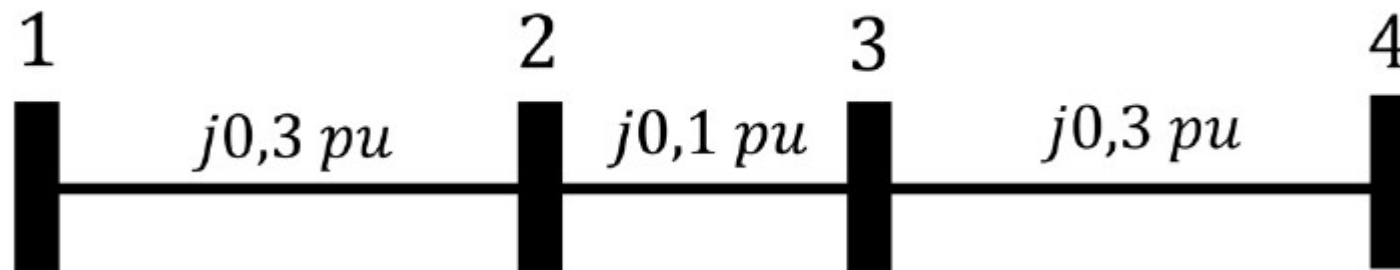
6

Figura 2.4 | Zonas para determinação dos valores de base



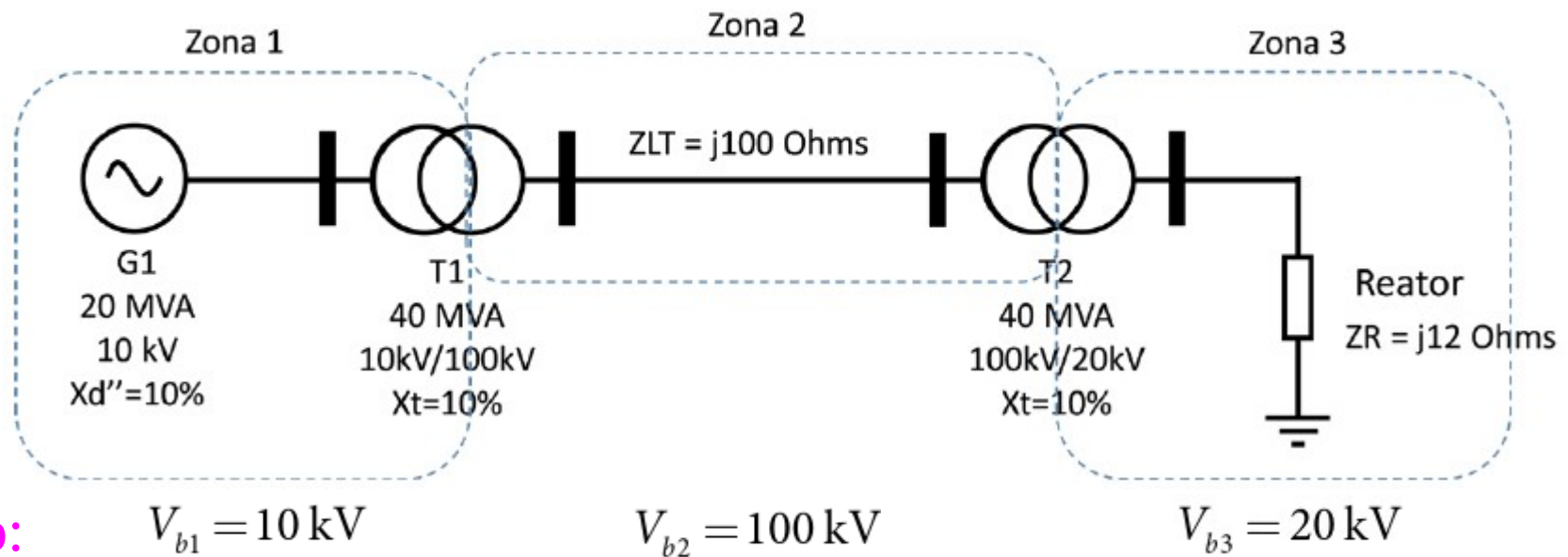
$$\begin{aligned} V_{b1} &= 10 \text{ kV} \\ V_{b2} &= 100 \text{ kV} \\ \text{base de } 100 \text{ MVA} \\ Z_{b2} &= 100 \Omega \\ z_{1-2} &= j0,3 \text{ pu} \\ z_{2-3} &= j0,1 \text{ pu} \\ z_{3-4} &= j0,3 \text{ pu} \end{aligned}$$

Figura 2.5 | Sistema equivalente em pu



Exemplo 3 (p. 68 do livro-texto SEP I)

Figura 2.7 | Sistema elétrico de potência com divisão em 3 zonas distintas

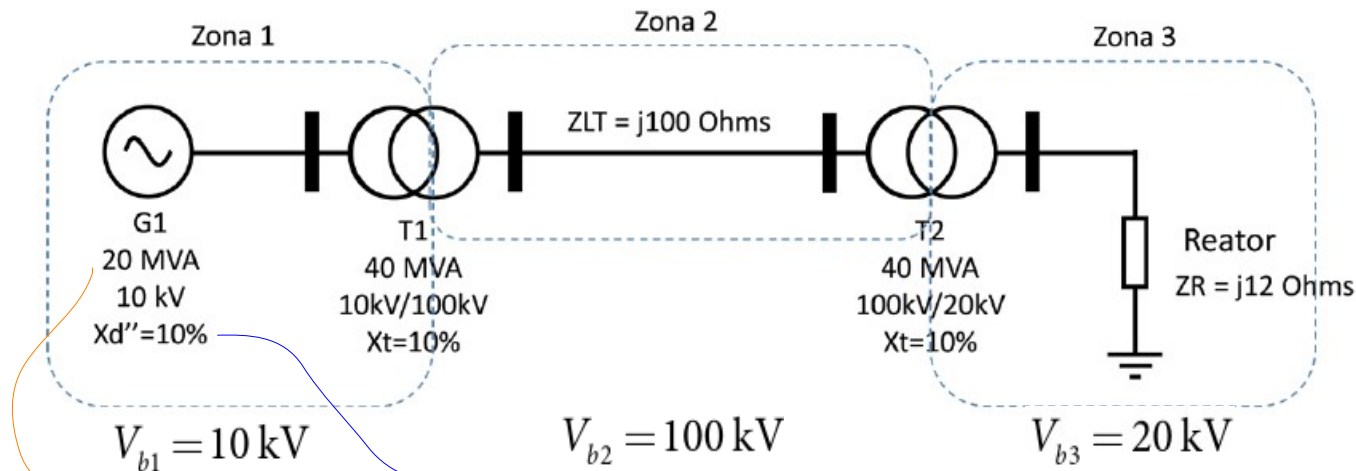


adotado:

adotado: $S_b =$ base de potência de 100 MVA

Impedâncias dos transformadores

Figura 2.7 | Sistema elétrico de potência com divisão em 3 zonas distintas



$$S_b = 100 \text{ MVA}$$

$$V_{b1} = 10 \text{ kV}$$

$$V_{b2} = 100 \text{ kV}$$

$$V_{b3} = 20 \text{ kV}$$

$$x_{d'}'' = x_d'' \left(\frac{S_b}{S_{bg}} \right) = 0,1 \left(\frac{100}{20} \right) = 0,5 \text{ pu}$$

$$x_{T1'}'' = x_{T1}'' \left(\frac{S_b}{S_{bg}} \right) = 0,1 \left(\frac{100}{40} \right) = 0,25 \text{ pu}$$

$$x_{T2'}'' = x_{T2}'' \left(\frac{S_b}{S_{bg}} \right) = 0,1 \left(\frac{100}{40} \right) = 0,25 \text{ pu}$$

$$I_{base} [A] = \frac{S_{base} [kVA]_{3\phi}}{\sqrt{3} V_{base} [kV]_{LL}}$$

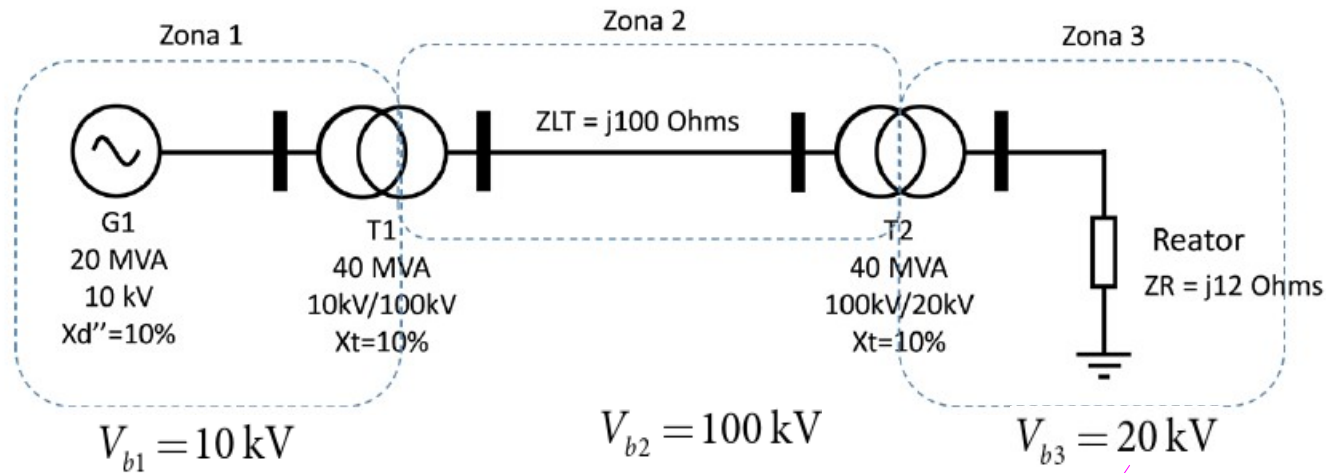
$$Z_{base} [\Omega] = \frac{(V_{base} [kV]_{LL})^2}{S_{base} [MVA]_{3\phi}}$$

$$Valor_{pu} = \frac{Valor_{real}}{Valor_{Base}}$$

$$Valor_{pu}^{Base2} = Valor_{pu}^{Base1} \frac{Base1}{Base2}$$

Impedâncias de base LT e ZR

Figura 2.7 | Sistema elétrico de potência com divisão em 3 zonas distintas



$$\begin{aligned}
 S_b &= 100 \text{ MVA} \\
 x_d &= 0,5 \text{ pu} \\
 x_{T1} &= 0,25 \text{ pu} \\
 x_{T2} &= 0,25 \text{ pu}
 \end{aligned}$$

$$Z_{b3} = \frac{(V_{b3})^2}{S_b} = \frac{(20 \times 10^3)^2}{100 \times 10^6} = 4 \Omega$$

$$Z_{b2} = \frac{(V_{b2})^2}{S_h} = \frac{(100 \times 10^3)^2}{100 \times 10^6} = 100 \Omega$$

$$I_{base} [A] = \frac{S_{base} [kVA]_{3\phi}}{\sqrt{3} V_{base} [kV]_{LL}}$$

$$Z_{base} [\Omega] = \frac{(V_{base} [kV]_{LL})^2}{S_{base} [MVA]_{3\phi}}$$

$$Valor_{pu} = \frac{Valor_{real}}{Valor_{Base}}$$

$$Valor_{pu}^{Base2} = Valor_{pu}^{Base1} \frac{Base1}{Base2}$$

primeiro tem
que achar as
impedâncias
de base

Sistema equivalente

Figura 2.7 | Sistema elétrico de potência com divisão em 3 zonas distintas

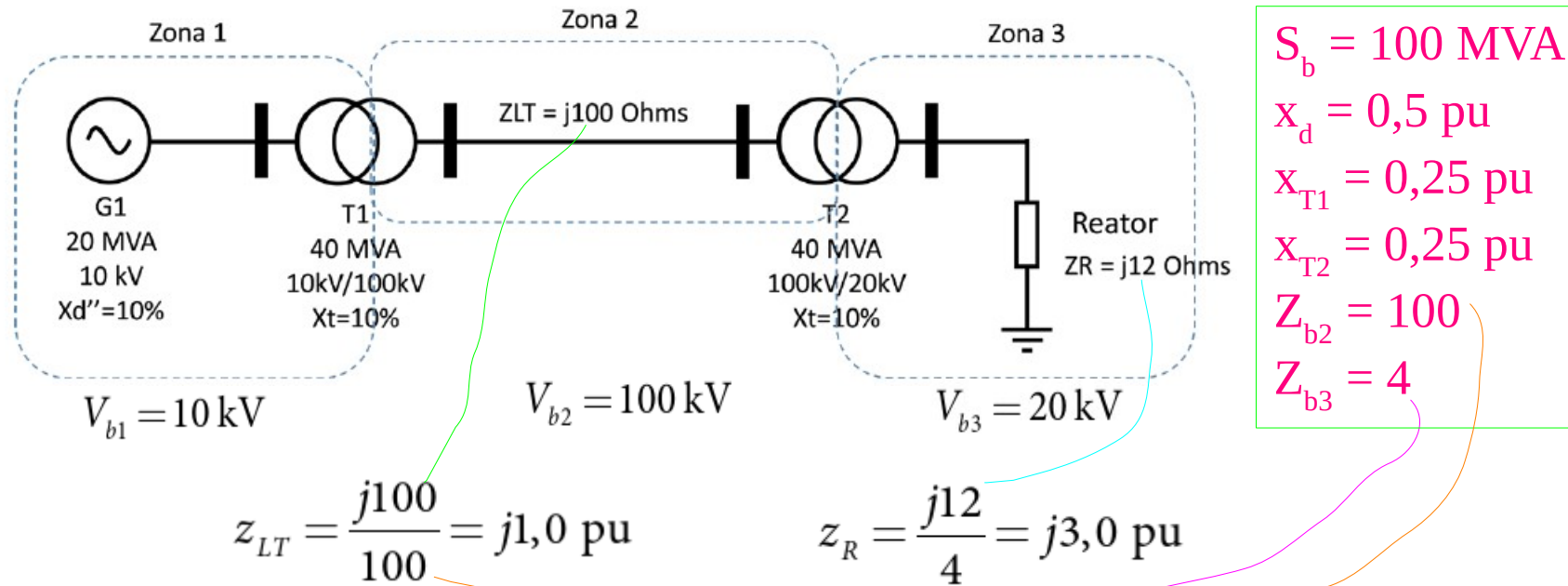
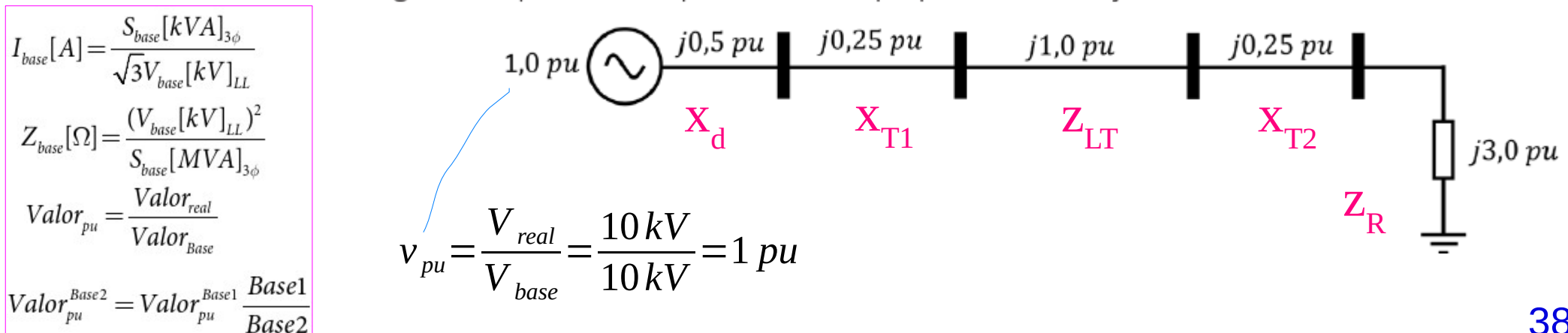
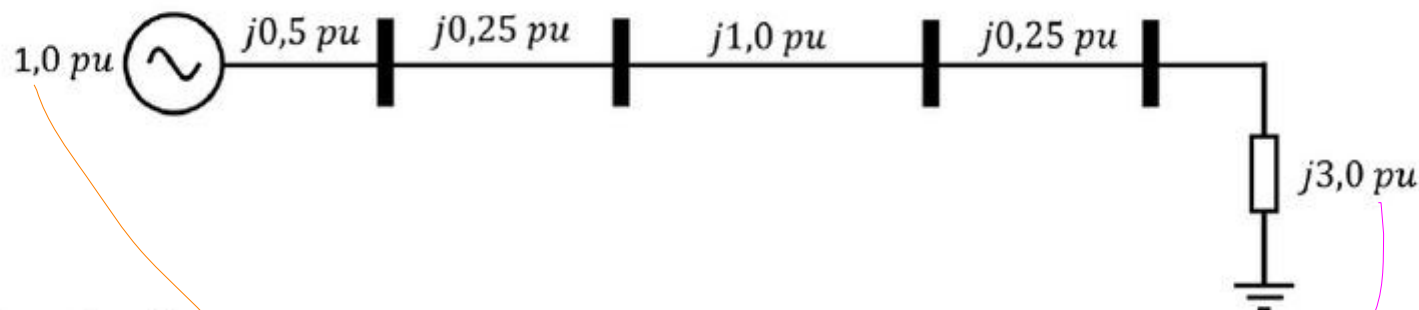


Figura 2.8 | Sistema equivalente em pu para alimentação do reator



Valor da potência em MVAr

Figura 2.8 | Sistema equivalente em pu para alimentação do reator



$$S_b = 100 \text{ MVA}$$

$$x_d = 0,5 \text{ pu}$$

$$x_{T1} = 0,25 \text{ pu}$$

$$x_{T2} = 0,25 \text{ pu}$$

$$Z_{b2} = 100$$

$$Z_{b3} = 4$$

$$z_{LT} = j1,0 \text{ pu}$$

$$z_R = j3,0 \text{ pu}$$

A corrente que passa pelo reator pode ser calculada em valores pu:

$$I_R = \frac{1}{j0,5 + j0,25 + j1,0 + j0,25 + j3,0} = -j\frac{1}{5} \text{ pu}.$$

A potência no reator, então, é dada por:

$$Q_R = jx_R I_R^2 = -j3,0 \cdot j\frac{1}{5} = 0,6 \text{ pu}$$

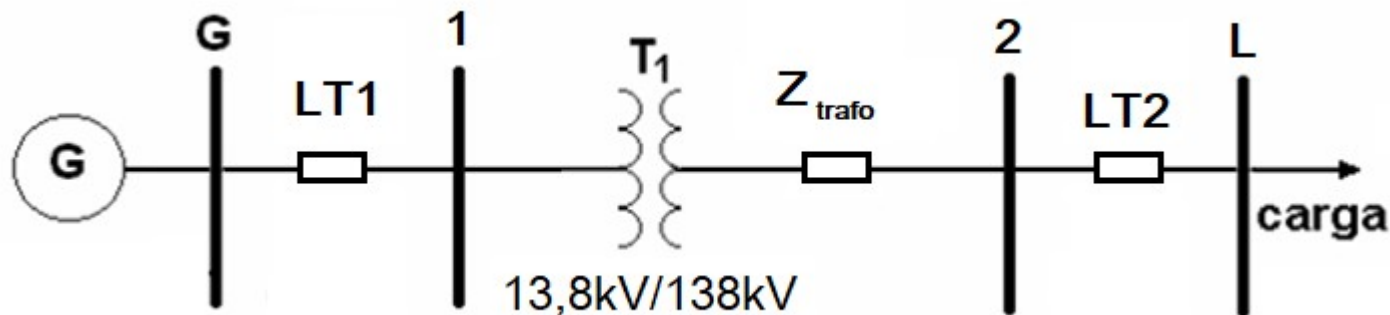
valor da potência em valores reais

$$Q_R(\text{MVA}_r) = Q_R \times S_b = 0,6 \times 100 = 60 \text{ MVA}_r.$$

Exemplo 4 usando o Jupyter Notebook

Encontre a tensão na barra conectada ao gerador e as perda total de potência das linhas em *pu*. Dados:

- $\dot{S}_{carga} = 15 + j5 \text{ MVA}$, $\dot{V}_{carga} = 138 \text{ kV}$;
- $\dot{Z}_{LT1} = 0,3 + j0,8 \Omega$; $\dot{Z}_{LT2} = 4 + j10 \Omega$;
- Trafo: 13,8kV/138kV, $Z_{\text{alta tensão}} = j15 \Omega$;
- Usar $S_B = 100\text{MVA}$.



Fonte: R K Portelinha. Sistema por Unidade (PU). UFPR.

exercpu.ipynb - JupyterLab

localhost:8888/lab/tree/disc/SEP_sex/Aula01-revisao/...

File Edit View Run Kernel Tabs Settings Help

exercpu.ipynb

Code

```
[1]: Sb = 100e6 # MVA
     Vb1 = 13.8e3 # kV
     Vb2 = 138e3 # kV
     Sc = 10+5j # MVA
     Vc = 138 # kV
     Zlt1 = .3+.8j # Ohm
     Zlt2 = 4+10j # Ohm
     Ztr = 15j # Ohm
```

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} \quad I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3}V_b} \quad z = \frac{Z}{Z_b}$$

```
[14]: Zb1 = Vb1**2 / Sb
      Zb2 = Vb2**2 / Sb
      Ib1 = Sb / ( 1.73 * Vb1 )
      Ib2 = Sb / ( 1.73 * Vb2 )
      zlt1 = Zlt1 / Zb1
      zlt2 = Zlt2 / Zb2
      ztr = Ztr / Zb2
```

```
[15]: Zb1, Zb2, Ib1, Ib2
```

```
[15]: (1.9044, 190.44, 4188.657116528441, 418.8657116528441)
```

```
[16]: zlt1, zlt2, ztr
```

```
[16]: ((0.1575299306868305+0.42007981516488135j),
      (0.021003990758244065+0.05250997689561017j),
      0.07876496534341525j)
```

Simple 0 \$ 1 No Kernel | Idle Mode: Command Ln 1, Col 1 exercpu.ipynb

Ferramenta Jupyter Notebook

Google Colab

<https://www.youtube.com/watch?v=Ai9qn9YII78>

<https://www.youtube.com/watch?v=5zr9HWWs8nI>

(e outros...)

JupyterLab

<https://www.youtube.com/watch?v=IMWkolcADn8>

<https://www.youtube.com/watch?v=SJXRvIDDKbI>

(e outros...)