

4.1 Um transformador monofásico de dois enrolamentos apresenta os seguintes valores nominais: 20 kVA, 480/120 V, 60 Hz. Em um ensaio de curto-circuito, onde a corrente nominal é aplicada ao enrolamento de 480 V (chamado aqui de primário) com o enrolamento de 120 V (chamado aqui de secundário) curto-circuitado, as seguintes grandezas foram medidas: $V_1 = 35$ V, $P_1 = 300$ W. Em um ensaio de circuito aberto, onde tensão nominal é aplicada no secundário com o primário em aberto, foram obtidos: $I_2 = 12$ A, $P_2 = 200$ W.

- Do ensaio de curto circuito, determinar a impedância série equivalente referida ao enrolamento primário.
- Do ensaio de circuito aberto, determinar a admitância *shunt* equivalente referida ao enrolamento primário.
- Calcular a tensão, a potência aparente e o fator de potência no enrolamento primário no caso de uma carga resistiva de 120 V, 20 kVA ser conectada ao enrolamento secundário.
- Avaliar o erro cometido ao desprezar a admitância *shunt*.

4.2 Um transformador monofásico possui as seguintes características:

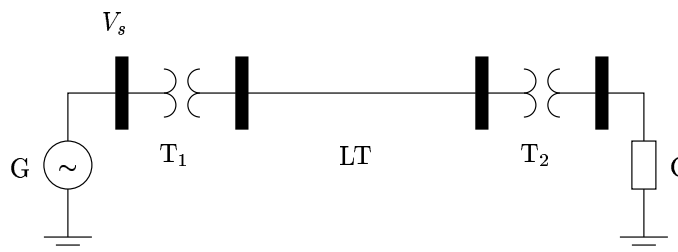
$N_1 = 100$ espiras	$N_2 = 300$ espiras
$R_c = 2088 \Omega$	$X_m = 988 \Omega$
$Z_T = 0,075 + j 0,45 \Omega$	

em que N_1 e N_2 são os números de espiras dos enrolamentos primário e secundário, Z_T é a impedância série total, R_c é a resistência de perdas no núcleo e X_m é a reatância de magnetização, todos referidos ao primário (lado de baixa tensão).

Um gerador de 3 kV, 60 Hz é conectado ao enrolamento primário para alimentar uma carga de impedância igual a $Z_c = 100 + j 30 \Omega$ conectada ao enrolamento secundário. Obter a corrente no primário, a corrente no secundário e a eficiência do transformador usando:

- o modelo de transformador ideal.
- o modelo de transformador real. Verificar as diferenças em relação ao item (a).

4.3 Considerar o circuito monofásico mostrado a seguir.



Os dados relativos ao circuito são os seguintes:

Gerador (G)	$V_s = 220 \text{ V}$
Transformador (T_1)	30 kVA, 240/480 V, $x_1 = 0,1 \text{ pu}$
Linha de transmissão (LT)	$X_L = 2 \Omega$
Transformador (T_2)	20 kVA, 460/115 V, $x_2 = 0,1 \text{ pu}$
Carga (C)	$Z_c = 0,9 + j 0,2 \Omega$

As resistências e admitâncias *shunt* dos transformadores são desprezadas. Utilizar uma base de 30 kVA e 240 V para o gerador.

- Obter o circuito em por unidade.
- Calcular as correntes no gerador e na carga em p.u. e em Ampères.
- Calcular as potências ativa e reativa fornecidas pelo gerador e consumidas pela carga.
- Calcular as perdas de potência ativa e reativa na linha.

4.4 As características de um transformador trifásico de três enrolamentos são:

Enrolamento 1	300 MVA	13,8 kV
Enrolamento 2	300 MVA	199,2 kV
Enrolamento 3	50 MVA	19,92 kV

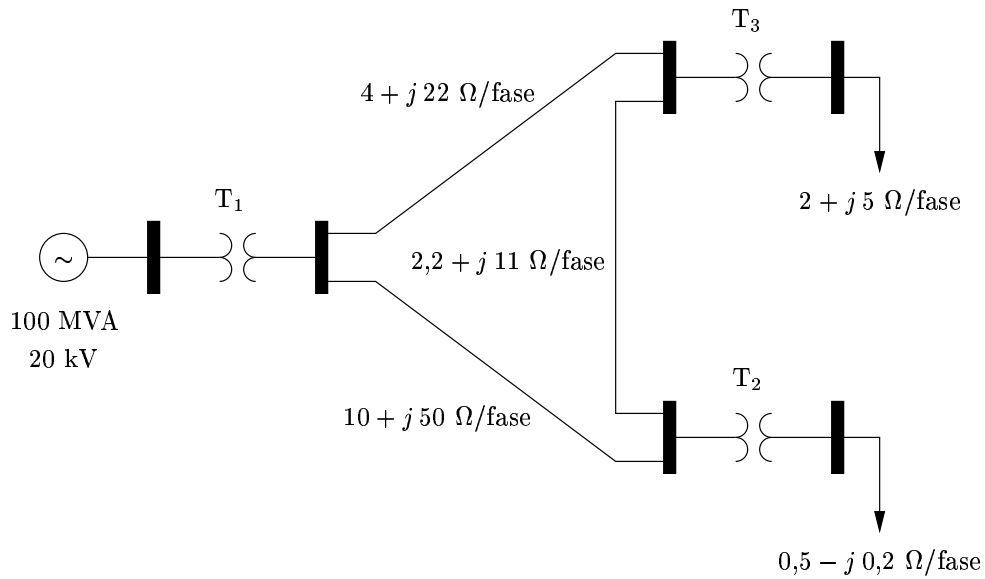
Através de ensaios de curto-circuito as seguintes reatâncias foram obtidas:

$$\begin{aligned}
 x_{12} &= 0,10 \text{ pu} & \text{base} & \rightarrow & 300 \text{ MVA}/13,8 \text{ kV} \\
 x_{13} &= 0,16 \text{ pu} & \text{base} & \rightarrow & 50 \text{ MVA}/13,8 \text{ kV} \\
 x_{23} &= 0,14 \text{ pu} & \text{base} & \rightarrow & 50 \text{ MVA}/199,2 \text{ kV}
 \end{aligned}$$

As resistências e a corrente de excitação são desprezadas.

- Deduzir as equações das reatâncias do circuito equivalente a partir das reatâncias dos ensaios de curto-circuito.
- Calcular as reatâncias do circuito equivalente do transformador utilizando os valores de base 300 MVA e 13,8 kV para o enrolamento 1.
- Uma das reatâncias do circuito equivalente calculada no item (b) apresenta sinal negativo. Explicar o resultado.

4.5 Considerar o diagrama unifilar de um sistema trifásico mostrado a seguir.



T ₁	T ₂	T ₃
110 MVA	70 MVA	40 MVA
22/220 kV	230/11,8 kV	220/10 kV
$x_1 = 8\%$	$x_2 = 10\%$	$x_3 = 10\%$

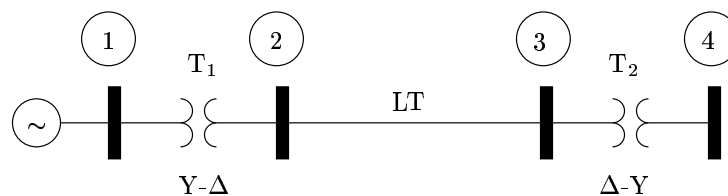
Obter o circuito em pu por unidade. Considerar os valores de base 100 MVA e 20 kV para o gerador. As potências dadas são trifásicas e as tensões são de linha.

4.6 Um barramento infinito alimenta, por meio de um transformador e de uma linha de transmissão, uma carga indutiva monofásica que consome 50 MVA, 40 MW quando alimentada por uma tensão de 62,8 kV, 60 Hz. Sabe-se ainda que:

- a tensão no barramento infinito é de 220 kV;
- o transformador trifásico de 100 MVA, 220/69 kV, $x = 8\%$ tem um comutador de *tap* no enrolamento de baixa tensão que permite um ajuste de $\pm 10\%$ em 20 posições;
- a impedância da linha de transmissão é de $0,04 + j0,06$ pu na base 69 kV, 100 MVA.

Ajustar a posição do *tap* do transformador tal que a tensão na carga fique o mais próximo possível de 69 kV.

4.7 Considerar o diagrama unifilar do circuito trifásico mostrado a seguir.

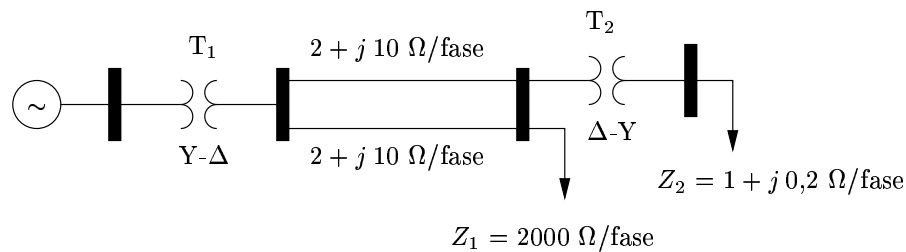


Os transformadores T_1 e T_2 são bancos trifásicos e os dados de placa dos transformadores monofásicos são:

T_1	T_2
19,92/345 kV	345/39,84 kV
40 Ω (lado BT)	120 Ω (lado AT)

A linha de transmissão tem 50 km de comprimento e parâmetros $R_L = 0,22 \Omega/\text{km}$ e $L_L = 6,5 \text{ mH}/\text{km}$. A capacitância da linha é desprezível. Obter o circuito equivalente visto pela barra 4.

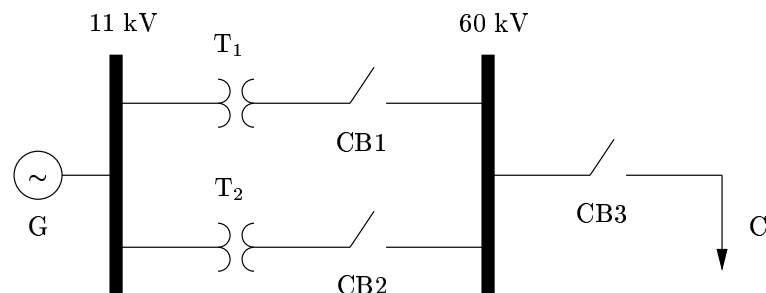
4.8 Considerar o circuito trifásico mostrado na figura a seguir.



T_1	T_2
100 MVA	60 MVA
12/220 kV	220/10 kV
$x_1 = 6\%$	$x_2 = 8\%$

- (a) Determinar o modelo equivalente por fase em por unidade usando como base os dados nominais dos transformadores. Desprezar a corrente de excitação dos transformadores e as capacitâncias das linhas de transmissão.
- (b) Sabendo-se que a tensão na carga do lado de baixa tensão do transformador T_2 é de 8 kV, calcular:
- a tensão em kV nos terminais do gerador (módulo e fase);
 - as potências ativa e reativa em MW/MVAr fornecidas pelo gerador;
 - o fator de potência visto pelo gerador.

4.9 Considerar a rede mostrada a seguir.



Os transformadores T_1 e T_2 operam em paralelo, transformando potência entre uma barra geradora de 11 kV e uma barra de 60 kV de uma subestação que alimenta uma carga total de 80 MW e 60 MVar. A barra da subestação deve ser mantida exatamente na tensão de 60 kV. Os transformadores T_1 e T_2 são de 50 MVA, 11/60 kV, Y-Y. Suas reatâncias são iguais a 6% e 8%, respectivamente. A rede dispõe também de três disjuntores, CB1, CB2 e CB3.

- Para os três disjuntores fechados, calcular os carregamentos dos transformadores e verificar que T_1 (que tem a menor reatância de dispersão) está sobrecarregado.
- As relações de transformação de ambos os transformadores podem variar de 95% a 105% do valor nominal em passos discretos de 0,5%. Supor que a relação de transformação de T_1 seja aumentada de 3,5% (1 : 0,965). Com os disjuntores CB2 e CB3 abertos e CB1 fechado, calcular a tensão medida sobre CB2. Lembrar que a tensão na barra da subestação deve ser mantida em 60 kV.
- Pode-se mostrar (teorema de Thévenin) que, ao se fechar CB2, uma corrente $i_c = \Delta v / z_{loop}$ passará por ele e circulará pelos transformadores. Δv é a tensão sobre CB2 calculada no item (b) e z_{loop} é a impedância do circuito vista dos terminais de CB2. Calcular i_c .
- Fechando-se o disjuntor CB3, corrente será fornecida à carga. Usando o teorema da superposição, calcular as novas correntes nos transformadores levando em conta a presença da corrente de circulação i_c . Verificar que as correntes nos transformadores são mais próximas de 1 pu que as calculadas no item (a).
- Calcular os carregamentos dos transformadores na nova situação.
- Repetir os itens de (b) a (f) para as seguintes alterações dos *taps*: aumento de 2% em T_1 e redução de 1,5% em T_2 . Comparar os resultados e verificar que, apesar de Δv e i_c não mudarem, a tensão na barra de geração agora pode ser ajustada em um valor menor que no item (e).
- Como as impedâncias dos transformadores são puramente reativas, a corrente de circulação estará sempre defasada de 90° (atrasada ou adiantada, dependendo das relações de transformação adotadas) em relação à tensão de referência. Portanto, pode-se controlar somente a componente reativa das correntes dos transformadores. Isto equivale a dizer que só se pode controlar os fluxos de potência reativa. Explicar como se poderia controlar também os fluxos de potência ativa.

4.10 Um transformador trifásico de três enrolamentos apresenta as seguintes características:

Enrolamento	Ligação	Tensão	Potência
		nominal (kV)	nominal (MVA)
primário	Y	14,85	15
secundário	Y	66	15
terciário	Δ	4,8	5,25

Foram realizados os ensaios para a determinação dos parâmetros do circuito equivalente do transformador, resultando nos seguintes valores:

Medição	Impedância	Enrolamento	Enrolamento	Impedância (%)	Potência de base (MVA)
	medida no enrolamento	curto-circuitado			
z_{12}	prim.	sec.	terc.	6,9	15
z_{13}	prim.	terc.	sec.	5,6	5,25
z_{23}	sec.	terc.	prim.	3,8	5,25

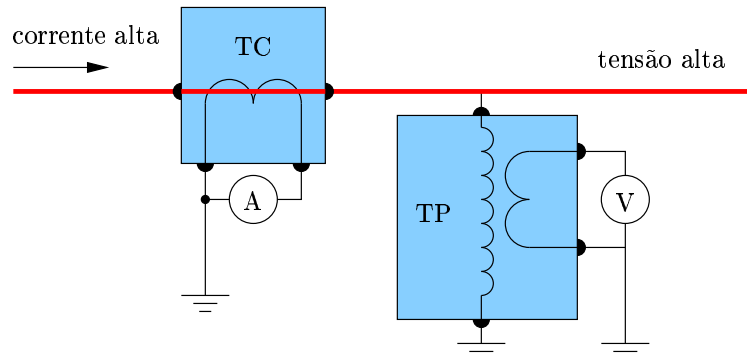
- Calcular os parâmetros do circuito equivalente z_1 , z_2 e z_3 .
- Um gerador foi conectado ao enrolamento primário para a alimentação de cargas nos enrolamentos secundário e terciário. As seguintes medidas foram realizadas:

$$\begin{array}{l} V_3 = 4,80 \text{ kV} \quad P_3 = 5,25 \text{ MW} \quad Q_3 = 0 \\ P_2 = 8 \text{ MW} \quad Q_2 = 6 \text{ MVar} \end{array}$$

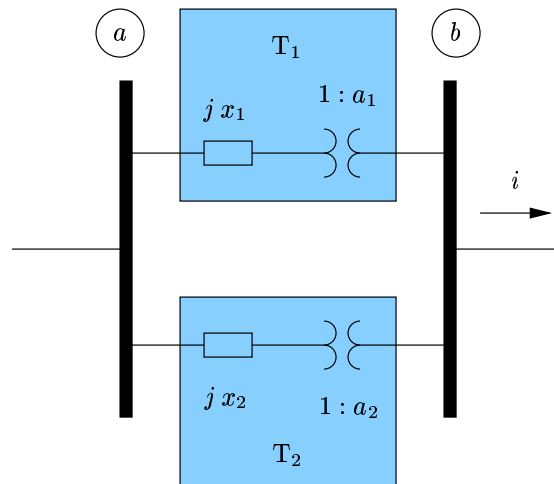
Obter as tensões nos enrolamentos primário e secundário.

- (c) Para as mesmas condições do item (b), calcular o carregamento no enrolamento primário e o fator de potência visto pelo gerador.

4.11 Para a medição e proteção usa-se os transformadores de corrente (TC) e de potencial (TP) ligados ao barramento da alta tensão, como mostra a figura a seguir.



- (a) Se a relação de transformação é definida como $a = N_{at}/N_m$, em que os índices at e m indicam respectivamente os lados de alta tensão e medição, por que se tem normalmente $a \gg 1$ para o TP e $a \ll 1$ para o TC?
- (b) Por que deve-se conectar ao secundário de um TC uma impedância tão pequena quanto possível e de um TP uma tão grande quanto possível? *Sugestão: fazer a análise baseada no circuito equivalente do transformador.*
- (c) Se um TC for acidentalmente colocado em vazio, o equipamento será destruído devido a perdas excessivas no núcleo. Se um TP for curto-circuitado, ele será destruído devido a perdas excessivas no cobre. Justificar as duas afirmações.
- 4.12 Duas barras a e b são conectadas através de dois transformadores de reatâncias $x_1 = 0,1$ e $x_2 = 0,2$ por unidade, e posições dos *taps* a_1 e a_2 , como mostra a figura a seguir.



A barra b é uma barra de carga, e fornece uma corrente $i = 1,0\angle -30^\circ$ pu. A sua tensão é mantida constante igual a 1,0 pu. Inicialmente os *taps* dos transformadores estão em suas posições nominais, ou seja, $a_1 = a_2 = 1$.

- (a) Determinar a tensão no barramento a .
- (b) Determinar a potência fornecida pelo barramento a e as perdas de potência nos transformadores.
- (c) A posição do *tap* do transformador T_2 é alterada no sentido de aumentar a tensão no lado da carga em 3% ($a_2 = 1,03$). Como a tensão na barra b é mantida constante, espera-se que a tensão na barra a diminua. Calcular a potência fornecida pela barra a e verificar que há alterações significativas nas potências reativas pelos transformadores. (*Sugestão: utilizar o procedimento baseado no cálculo da corrente de circulação apresentado no exercício 4.9.*)
- (d) Repetir o item (c) considerando que T_2 seja um transformador defasador, e que a posição do seu *tap* seja ajustada de forma a avançar a fase da barra de carga em 2° , ou seja, $a_2 = e^{j\pi/90}$. Verificar agora que as alterações significativas ocorrem nas potências ativas.

4.13 Dois transformadores T_1 e T_2 operam em paralelo. Suas reatâncias são iguais a 0,10 e 0,14 pu (base de 100 MVA), respectivamente. T_2 possui *tap* variável, estando inicialmente na posição nominal. A posição do *tap* de T_2 pode variar de 0,9 a 1,1, em passos de 0,01. Uma carga de 1,0 pu, fator de potência 0,8 atrasado, está conectada ao barramento de carga, cuja tensão é mantida constante em 1,0 pu.

- (a) Calcular a potência fornecida pelo barramento fonte.
- (b) Deseja-se fazer com que o fluxo de potência reativa pelo transformador T_2 diminua de 12 MVar, fluxo esse que será assumido por T_1 . Obter a posição do *tap* de T_2 a ser ajustada de forma a atender o objetivo.