

TRANSFORMADORES

Quando temos cargas elétricas grandes ou necessitamos de transmitir energia elétrica por longas distâncias aparecem algumas dificuldades. Essas dificuldades devem ser contornados através de novos recursos e equipamentos.

Neste capítulo, estudaremos os transformadores.

11.1 INTRODUÇÃO

Nos capítulos anteriores, vimos que a queda de tensão em um resistor era determinado por $\dot{V}_R = R \dot{I}$ e em um indutor por $\dot{V}_L = jX_L \dot{I}$. Vimos também que a resistência em um condutor elétrico era definido por

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (4.7)$$

e que a indutância em uma bobina pode ser calculada por

$$L i = N \phi. \quad (8.1)$$

Vamos considerar um pequeno trecho de uma espira dessa bobina de tal forma que possamos aproximá-lo por um segmento de reta. Então, quando aplicarmos uma tensão alternada na bobina, teremos uma corrente alternada circulando pela mesma e uma indutância na bobina. Conseqüentemente, o segmento de reta terá uma pequena indutância. Aumentando o raio do círculo da bobina de modo que tenda ao infinito, poderemos aumentar também o comprimento do segmento de reta de modo que ele também tenda ao infinito. Então o comprimento do segmento cresce, assim como a sua própria indutância.

Um condutor elétrico longitudinalmente reto pode ser aproximado por um pequeno trecho de bobina grande. Ele tem, além de resistência elétrica, também indutância, reatância indutiva e impedância. Nele teremos quedas de tensão devido à resistência, à reatância indutiva ou uma queda de tensão total devido a sua impedância. Quando o comprimento do condutor cresce, a sua impedância cresce e também cresce a sua queda de tensão. Vamos supor, de forma simplificada, uma carga de aquecimento (puramente resistiva) com 10 kW de potência ativa na tensão de 127 V. Admitamos, também, que a carga se aqueça e aqueça algum material com a temperatura variando linearmente com a potência ativa na mesma, de forma que, para uma potência de 10 kW, se tenha uma elevação de 80°C a partir de uma temperatura ambiente de 20°C. A resistência elétrica da carga será considerada constante com a variação da temperatura. A tensão mínima de funcionamento da carga seja de 114,3 V (90% de 127V). Então, surgem as questões seguintes:

- 1) Qual a potência ativa da carga e seu aquecimento sobre a temperatura ambiente dos 20°C, se esta carga for alimentada diretamente por uma fonte de tensão alternada de 127 V, sem impedância no circuito de alimentação ($Z = 0 \Omega$).
- 2) Qual a potência ativa da carga e seu aquecimento sobre a temperatura ambiente dos 20°C se esta carga for agora alimentada a partir da mesma fonte de tensão, porém através de um circuito com 50 m de comprimento de um condutor de cobre de seção transversal de 1,5 mm² (admita, por simplificação que o condutor esteja na temperatura de 20°C e que a sua reatância indutância seja desprezível diante do valor de resistência).
- 3) Suponhamos agora que essa mesma carga esteja, em uma fazenda rural, a uma distância de 1000 m de uma rede elétrica de alimentação com a mesma tensão da

fonte de tensão alternada, como mostrado na Fig. 11.1. Então, qual a sua potência ativa e seu aquecimento se a alimentação é feita através do mesmo circuito de 2).

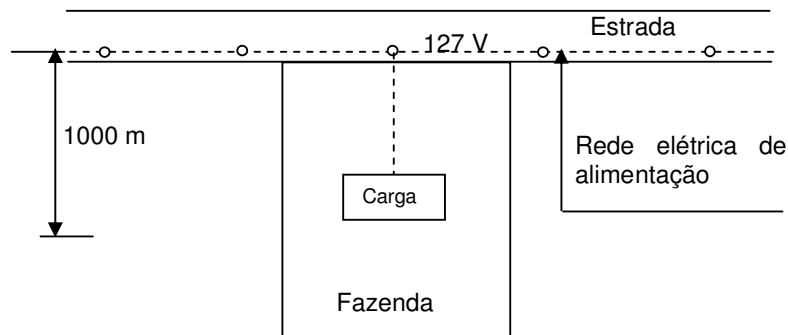


Fig. 11.1 – Carga de 10 kW alimentada a partir de uma rede elétrica.

Analisando a 1ª. questão, percebe-se que a tensão de $127 \angle 0^\circ$ está aplicada diretamente na carga. Então a potência ativa fornecida por esta é de 10 kW e a elevação de temperatura será de 80°C a partir dos 20°C de temperatura ambiente. A temperatura final da carga será de 100°C . A sua resistência elétrica será de $R_{\text{carga}} = V^2 / P = 1,613 \Omega$ e a corrente elétrica $I = V/R = 78,74 \text{ A}$.

Verificando a 2ª. questão, tem-se:

- a) resistência elétrica de cada condutor que alimenta a carga

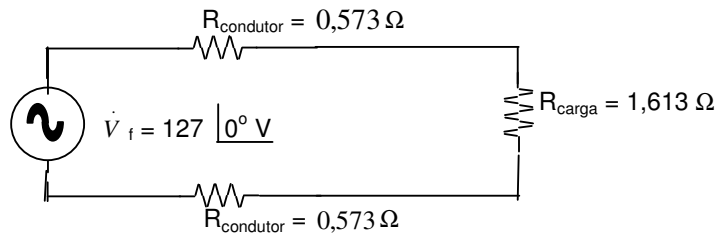
$$\rho_{20} = 1,72 \times 10^{-8} \Omega.$$

$$\text{Comprimento do condutor } l = 1000 \text{ m}$$

$$\text{Seção do condutor } S = 1,5 \text{ mm}^2.$$

$$R_{\text{condutor}} = \rho_{20} \frac{l}{S} = 1,72 \times 10^{-8} \frac{1000}{1,5 \times 10^{-6}} = 0,573 \Omega.$$

- b) circuito elétrico



$$\text{Onde } R_{\text{Total}} = R_{\text{condutor}} + R_{\text{carga}} + R_{\text{condutor}} = 0,573 + 1,613 + 0,573 = 2,759 \Omega$$

$$I = 127 \angle 0^\circ / 2,759 = 46,03 \angle 0^\circ \text{ A.}$$

$$\dot{V}_{\text{carga}} = R_{\text{carga}} \dot{I} = 1,613 \times 46,03 \angle 0^\circ = 74,25 \angle 0^\circ \text{ V.}$$

$$\dot{V}_{\text{condutor}} = R \dot{I} = 0,573 \times 46,03 \angle 0^\circ = 26,38 \angle 0^\circ \text{ V.}$$

$$\text{Queda de tensão nos dois condutores} = 52,75 \angle 0^\circ \text{ V.}$$

- c) Potência ativa da carga e seu aquecimento

$$P_{\text{carga}} = R_{\text{carga}} I^2 = 1,613 \times 46,03^2 = 3418 \text{ W.}$$

$$\text{Aquecimento} = 80^\circ\text{C} \times 3418 / 10.000 = 27,34^\circ\text{C}$$

$$\text{Temperatura final da carga} = 20 + 27,34 = 47,34^\circ\text{C}$$

Pode-se notar que o módulo da corrente cai de 78,74 A da 1ª. questão para 46,04 A nesta questão e que dos 127 V inicialmente aplicados na carga, agora só se tem 74,25 V. A diferença de tensão aparece aplicada nos condutores. Nota-se ainda que já nessa instalação, a carga só atinge 34,18% de elevação da temperatura final devido a baixa potência na mesma.

Analisando a 3ª. questão, da mesma forma que foi analisada a 1ª. questão, nota-se que:

a) R_{carga} é a mesma.

$$R_{\text{condutor}} = 0,573 \times 1000/50 = 11,460 \, \Omega.$$

b) O circuito é o mesmo com a diferença do valor de resistência de cada condutor.

$$R_{\text{Total}} = 11,460 + 1,613 + 11,460 = 24,533 \, \Omega.$$

$$I = 127 \, \text{V} / 24,533 = 5,18 \, \text{A}.$$

$$V_{\text{carga}} = R_{\text{carga}} I = 1,613 \times 5,18 = 8,35 \, \text{V}.$$

$$V_{\text{condutor}} = R I = 11,46 \times 5,18 = 59,33 \, \text{V}.$$

$$\text{Queda de tensão nos dois condutores} = 118,65 \, \text{V em } 127 \text{V}.$$

c) Potência ativa da carga e seu aquecimento

$$P_{\text{carga}} = R_{\text{carga}} I^2 = 1,613 \times 5,18^2 = 43,2 \, \text{W}.$$

$$\text{Aquecimento} = 80^\circ \text{C} \times 43,2 / 10.000 = 0,004^\circ \text{C}$$

$$\text{Temperatura final da carga} = 20 + 0,004 = 20,004^\circ \text{C}$$

Nota-se que nas 2ª. e 3ª. questões, a carga não funciona devido as grandes quedas de tensão no circuito. Então, como poderia se contornar isto? Uma primeira forma é reduzir a resistência do condutor pelo aumento da sua seção transversal. No mercado existem, normalmente, seções transversais variando desde 1,5 mm² até 240 mm². Para instalações elétricas residenciais, as seções mais comuns são 1,5; 2,5; 4; 6 e 10 mm², podendo chegar até 16 mm², quando a soma das cargas residencial é grande. Em grandes instalações elétricas, pode-se usar o condutor de 240 mm². Como pode ser visto no quadro 11.1, nos condutores de seção pequena, como os aplicados em instalações elétricas residenciais, $R_{\text{condutor}} \gg X_{\text{L condutor}}$, $Z_{\text{condutor}} \approx R_{\text{condutor}}$ e conseqüentemente só se considera R_{condutor} nos cálculos das quedas de tensão. Para condutores de seções maiores, $X_{\text{L condutor}} \geq R_{\text{condutor}}$ e os cálculos se tornam mais trabalhosos. Além disto, o metro do condutor de 1,5 mm² custa aproximadamente R\$ 0,38, enquanto o metro do condutor de 16 mm² custa aproximadamente R\$ 3,56 e o de 240 mm² custa aproximadamente R\$ 53,92. Aumentando-se a seção do condutor, aumentar-se-á conseqüentemente o custo da instalação elétrica. Esse aumento de seção pode tornar a instalação elétrica viável tecnicamente mas inviável economicamente.

Quadro 11.1
Dados aproximados de condutores elétricos

Seção do condutor (mm ²)	R_{condutor} (Ohms/km)	$X_{\text{L condutor}}$ (Ohms/km)	Custo Aproxim. R\$/m
1,5	11,4667	0,2322	0,38
2,5	6,8800	0,2206	0,58
4	4,3000	0,2171	0,88
6	2,8667	0,2081	1,28
10	1,7200	0,1945	2,35
16	1,0750	0,1849	3,56
25	0,6880	0,1837	5,69
50	0,3440	0,1796	11,65
120	0,1433	0,1695	27,00
240	0,0717	0,1652	53,92
500	0,0344	0,1625	-

Custos em 11/06/04

Uma outra forma de se contornar esses problemas é trabalhar com uma tensão elétrica bem maior, como exemplo 8000 V, no circuito de alimentação da carga e transformá-la na tensão da carga no ponto de atendimento da mesma. Considerando uma dada potência aparente da carga, transmitida no circuito, então, aumentando-se a tensão elétrica de transmissão diminuir-se-á a corrente e conseqüentemente a queda de tensão nos condutores do circuito, passando a carga a trabalhar com uma tensão maior e uma potência ativa maior. Isto será visto no restante deste capítulo.

11.2 O TRANSFORMADOR

Um transformador transforma uma tensão em uma outra tensão. Vamos considerar duas bobinas em um núcleo ferromagnético, como mostrado na Fig. 11.2. A bobina do lado esquerdo, ou primeira bobina, tem N_p espiras e é denominada de *enrolamento primário* (primeiro). A bobina do lado direito, ou segunda bobina, tem N_s espiras e é denominada de *enrolamento secundário* (de segundo).

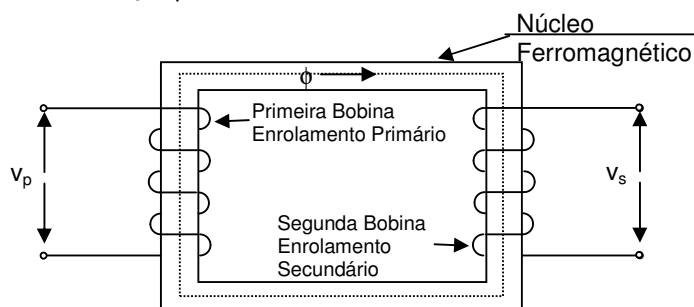


Fig. 11.2 – 2 bobinas colocadas em um núcleo ferromagnético

Então, aplicando uma tensão alternada v_p no enrolamento primário, pela lei de Faraday tem-se

$$v_p = N_p \frac{d\phi}{dt}. \quad (11.1)$$

O fluxo eletromagnético circulando no enrolamento secundário induzirá a tensão v_s , também dada pela lei de Faraday,

$$v_s = N_s \frac{d\phi}{dt}. \quad (11.2)$$

Substituindo a equação (11.2) na equação (11.1), tem-se

$$\frac{v_p}{N_p} = \frac{v_s}{N_s}, \quad (11.3)$$

ou

$$\frac{v_p}{v_s} = \frac{N_p}{N_s}. \quad (11.3a)$$

Fazendo $N_p/N_s = a$, e denominando “a” de *relação de espiras entre os enrolamentos primário e secundário* ou *relação de transformação*, tem-se uma transformação de tensão dada por

$$\frac{v_p}{v_s} = a. \quad (11.4)$$

Para a tensão v_p aplicada ao enrolamento primário, tem-se uma tensão $v_s = v_p/a$ no

enrolamento secundário. Por outro lado, aplicando-se uma tensão v_s no enrolamento secundário, tem-se uma tensão $v_p = a v_s$ no enrolamento primário. Essa constituição de duas bobinas em um núcleo ferromagnético é um transformador. Ela transforma uma tensão primária em uma tensão secundária ou uma tensão secundária em uma tensão primária.

Os transformadores usados nos sistemas elétricos são fabricados dessa forma, para uma tensão de projeto V_p no enrolamento primário (denominada de tensão nominal do primário – V_{PN}) e uma tensão de projeto V_s no enrolamento secundário (denominada de tensão nominal do secundário – V_{SN}).

Para se representar um transformador em um circuito, pode-se usar um dos símbolos indicados na Fig. 11.3. O símbolo b) é o mais usado nos circuitos elétricos.

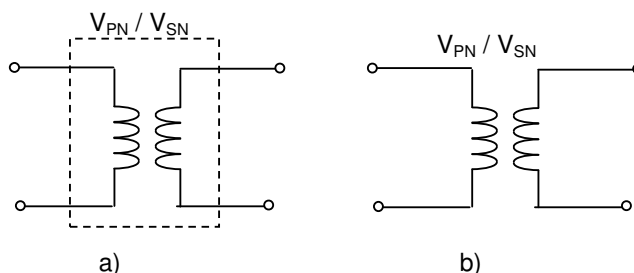


Fig. 11.3 – Símbolos de transformadores

Com os transformadores podemos transmitir grandes potências e grandes quantidades de energia elétrica em grandes distâncias, através de aumentos de tensão e diminuição das perdas elétricas. É o que acontece em um sistema elétrico, como mostrado na Fig. 11.4. Em uma usina elétrica (hidrelétrica, termelétrica, nuclear, eólica etc) se eleva a tensão para um valor compatível com a potência a ser transmitida e a distância da transmissão, abaixando essa tensão através de um ou mais transformadores, nas proximidades da carga elétrica. Nas proximidades da carga podem existir uma ou mais subestações (locais para transformações de tensões), distribuição de potência para uma ou mais cargas e seus transformadores.

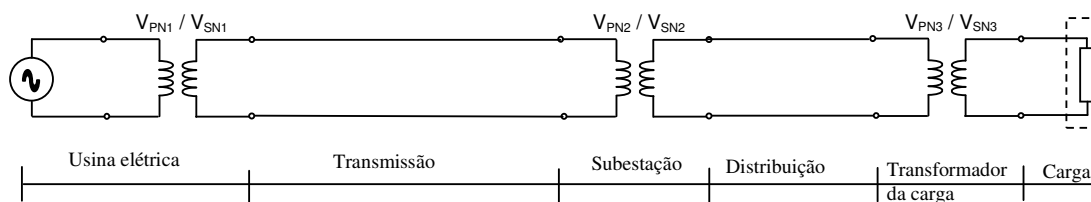


Fig. 11.4 – Um sistema elétrico

Exemplo 11.1: Suponhamos que se tem um transformador com 315 espiras no enrolamento primário e 5 espiras no enrolamento secundário. Pergunta-se:

- Qual a relação de transformação do transformador?
- Aplicando-se uma tensão de 8000 V no enrolamento primário, qual será a tensão no enrolamento secundário?
- Aplicando-se uma tensão de 220 V no enrolamento secundário, qual será a tensão no enrolamento primário?

Solução:

- Pela relação $N_p / N_s = a$ tem-se

$$a = \frac{315}{5} = 63.$$

Essa é a relação de transformação do transformador.

b) A partir da equação (11.4)

$$v_s = \frac{v_p}{a} = \frac{8000}{63} = 126,98V .$$

Essa é a tensão nos terminais do enrolamento secundário.

b) Pela mesma equação (11.4)

$$v_p = av_s = 63 \times 220 = 13860V .$$

Essa é a tensão nos terminais do enrolamento primário.

Exemplo 11.2: Um transformador foi projetado para ter uma tensão nominal no enrolamento primário de 6900V e uma tensão nominal de enrolamento secundário de 120 V. Pergunta-se:

a) Qual é a relação de transformação desse transformador?

b) Aplicando-se uma tensão de 6600 V no enrolamento primário, qual será a tensão no enrolamento secundário?

Solução:

a) Pela equação (11.4)

$$a = \frac{v_p}{v_s} = \frac{6900}{120} = 57,5 .$$

b) Pela mesma equação (11.4)

$$v_s = \frac{v_p}{a} = \frac{6600}{57,5} = 114,78V$$

11.3 O TRANSFORMADOR IDEAL

Vamos supor agora que se tem um transformador sem perdas elétricas, ou seja, que a potência aparente que sai no enrolamento secundário seja a mesma potência que entra no enrolamento primário. Então,

$$S_s = S_p , \tag{11.5}$$

e

$$\frac{i_p}{i_s} = \frac{1}{a} . \tag{11.6}$$

Além disto, vamos supor que tenhamos o circuito da Fig. 11.5 onde se tem uma fonte de tensão alimentando um transformador, através de duas impedâncias $\dot{Z}_1$ e $\dot{Z}_2$ representadas pelo símbolo , e este transformador alimenta uma carga qualquer, com impedância $\dot{Z}_C$, representada pelo mesmo símbolo. Nós queremos calcular a potência ativa ou aparente na carga.

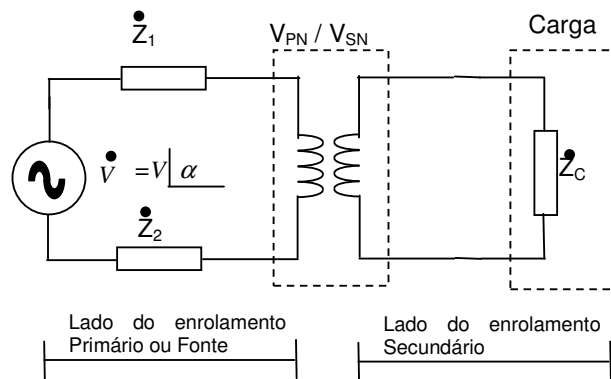


Fig. 11.5– Um circuito com um transformador.

Uma das formas de se resolver esse circuito é reduzi-lo inicialmente para o circuito da Fig. 11.6

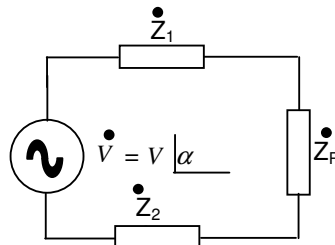


Fig. 11.6 – Circuito da Fig. 11.5 reduzido

onde $\dot{Z}_R = a^2 \dot{Z}_C$ é denominada *impedância refletida da carga*, no lado do enrolamento primário.

Com isso, elimina-se o símbolo do transformador no circuito e calcula-se a corrente $\dot{I}_p$ que sai da

fonte, sem se considerar o transformador. Com a equação (11.6), calcula-se a corrente $\dot{I}_s$, que nos permite calcular a potência na carga. Esse procedimento também se aplica a circuitos onde se tem mais impedâncias no lado do enrolamento secundário do transformador, como exemplo o circuito da Fig. 11.7. Neste caso, encontra-se uma impedância equivalente no lado do enrolamento secundário e se reflete-a para o lado do enrolamento primário. Elimina-se o transformador do circuito; calcula-se $\dot{I}_p$ e, em seguida $\dot{I}_s$, e se acaba de resolver o circuito.

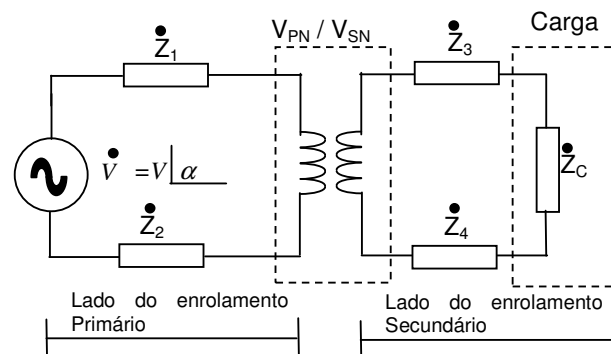


Fig. 11.7 – Um circuito com um transformador e impedâncias no primário e secundário.

Exemplo 11.3: Vamos voltar na mesma questão 3 da introdução, onde se tem a fazenda rural; a carga de aquecimento (puramente resistiva) com 10 kW de potência ativa na tensão de 127 V, a distância de 1000 m de uma rede elétrica de alimentação com uma tensão alternada de 8000 V, como mostrado na Fig. 11.8. Vamos supor que ao lado da carga se tenha um transformador 8000/127 V e que os 1000 m de distância continuem sendo de condutores de $1,5 \text{ mm}^2$. Vamos determinar qual será a nova potência ativa e o aquecimento da carga.

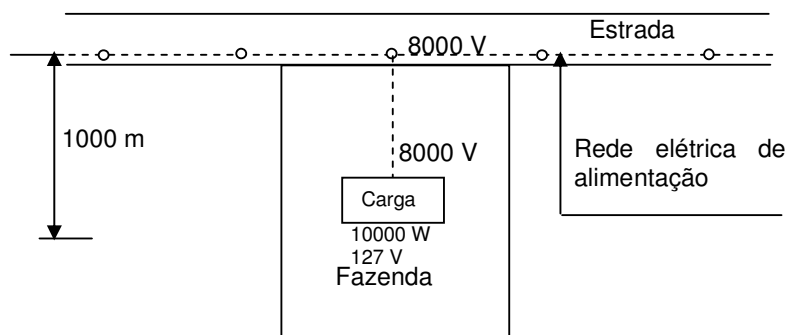
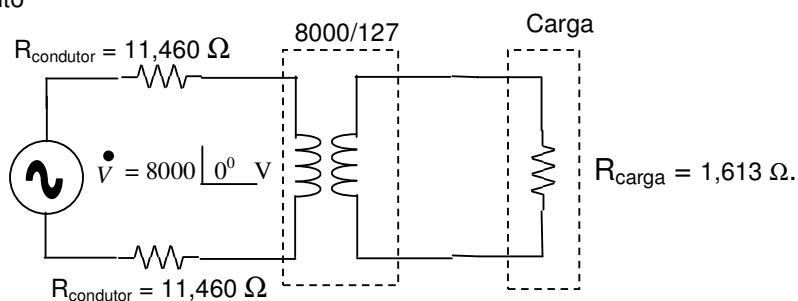


Fig. 11.8 – Carga de 10 kW alimentada a partir de uma rede elétrica de 8 kV.

Solução:

a) $R_{\text{carga}} = 1,613 \, \Omega$.
 $R_{\text{condutor}} = 11,460 \, \Omega$.

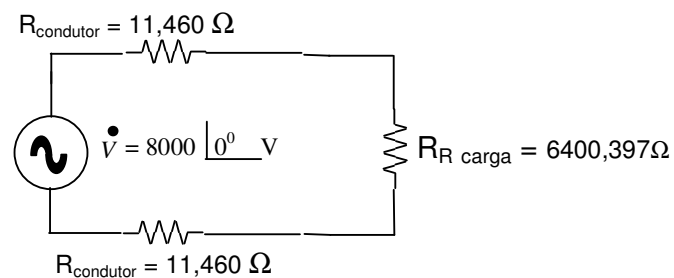
b) novo circuito



b) Relação de transformação
 $a = 8000/127 = 62,992$.

c) Resistência refletida da carga no enrolamento primário
 $R_{R \text{ Carga}} = a^2 \times R_{\text{carga}} = 62,992^2 \times 1,613 = 6400,397 \, \Omega$

d) redução do circuito



e) Resistência equivalente total do lado do enrolamento primário
 $R_{\text{Total}} = R_{\text{condutor}} + R_{R \text{ condutor}} + R_{\text{condutor}}$
 $= 11,460 + 6400,397 + 11,460 = 6423,317 \, \Omega$.

f) corrente no lado do enrolamento primário.

$$I_p = 8000 \angle 0^\circ / 6423,317 = 1,245 \angle 0^\circ \text{ A.}$$

g) corrente no lado do enrolamento secundário

$$I_s = a \times I_p = 62,992 \times 1,245 \angle 0^\circ = 78,425 \angle 0^\circ \text{ A.}$$

h) Potência ativa na carga

$$P_{\text{Carga}} = R_{\text{Carga}} \times I^2 = 1,613 \times 78,425^2 = 9921 \text{ W.}$$

i) Aquecimento da carga

$$\text{Aquecimento} = 80 \times 9921/10000 = 79,4^\circ \text{ C}$$

$$\text{Aquecimento total} = 79,4 + 20 = 99,4^\circ \text{ C.}$$

j) Queda de tensão nos condutores

$$\text{Queda de tensão em um condutor} = 11,460 \times 1,245 = 14,268 \text{ V}$$

$$\text{Queda de tensão nos dois condutores} = 28,535 \text{ V em } 8000 \text{ V.}$$

Percebe-se agora que a carga funciona e com a mesma seção de condutor de $1,5 \text{ mm}^2$ em 8000 V e um transformador de $8000/127 \text{ V}$. Quando se tem uma situação envolvendo 2 transformadores, como mostrado na Fig. 11.9, ou bem mais transformadores, a forma de cálculo nesses circuitos é similar a forma apresentada anteriormente, fazendo cálculo de tantas impedâncias refletidas quanto forem os transformadores, eliminando esses transformadores do circuito e reduzindo os circuitos a uma fonte de tensão e uma impedância total equivalente. Calcula-se a corrente que sai da fonte e, depois, as correntes I_s seguintes através das relações de transformação dos transformadores, até a corrente I_s desejada. Com essa corrente I_s desejada, determina-se a tensão e as potências na carga.

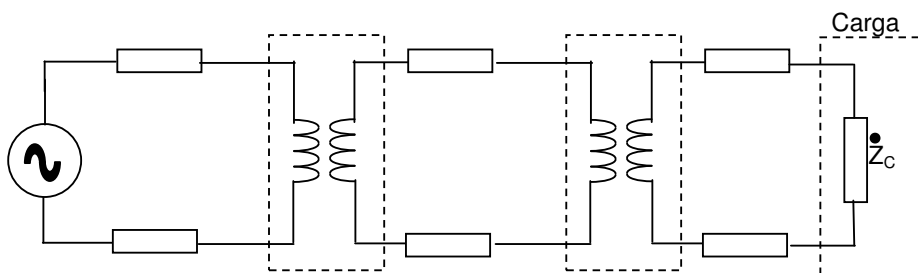


Fig. 11.9 – Uma alimentação de uma carga através de 2 transformadores.

Problemas Propostos

11.1 Refazer os cálculos das questões 1 e 2 da introdução deste capítulo sem transformador, considerando seções de condutores com 16 mm^2 e 240 mm^2 , e calcular os custos de todos os condutores. Nesses cálculos, não considerar os valores de reatância indutiva.

11.2 Provar a expressão da equação (11.6).

11.3 Seja a carga alimentada por um transformador ideal (sem perdas), como mostrado na Fig. 11.10. Pede-se a tensão e a corrente fasoriais na carga, com suas unidades.

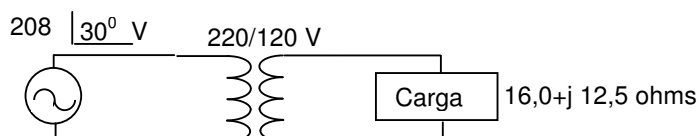


Fig. 11.10 – circuito do problema 11.3.

11.4 Seja a carga alimentada por um transformador ideal (sem perdas), como mostrado na Fig. 11.11. Pede-se:

- a tensão fasorial na carga;
- a corrente fasorial na carga;
- as potências aparente, ativa e reativa na carga;
- o fator de potência na carga.

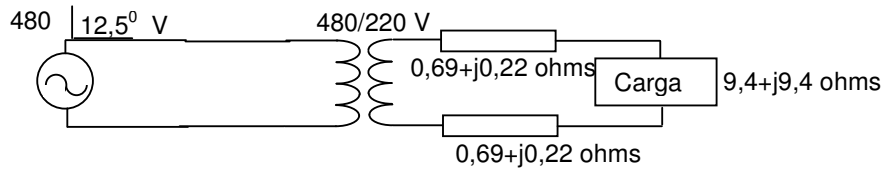


Fig. 11.11 – circuito do problema 11.4.

11.5 Seja uma nova carga alimentada por um transformador ideal (sem perdas), como mostrado na Fig. 11.12. Pede-se:

- a tensão e a corrente fasoriais na carga;
- as potências aparente, ativa e reativa na carga;
- a potência aparente no primário do transformador.

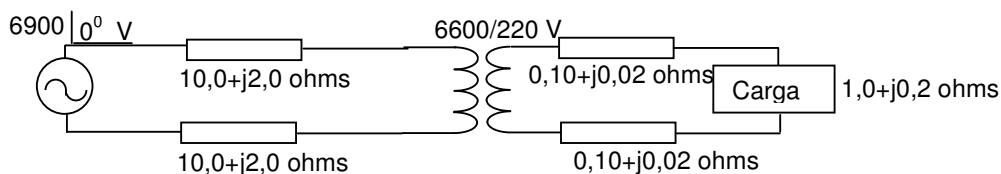


Fig. 11.12 – circuito do problema 11.5.

11.6 Sejam duas cargas alimentadas por um transformador ideal (sem perdas), como mostrado na Fig. 11.13. Pede-se:

- a tensões e corrente fasoriais em cada carga;
- as potências aparentes, ativas e reativas em cada carga;
- as potências aparente, ativa e reativa no primário do transformador.

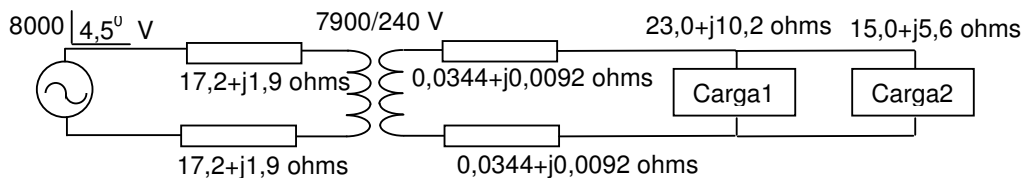


Fig. 11.13 – circuito do problema 11.6.

11.7 Seja um sistema elétrico como mostrado na Fig. 11.14. Pede-se:

- a tensão e a corrente fasoriais na carga;
- as potências aparente, ativa e reativa na carga;
- as tensões e correntes nos primários e secundários dos trafos TR1 e TR2.
- as potências aparente, ativa e reativa na fonte de tensão.

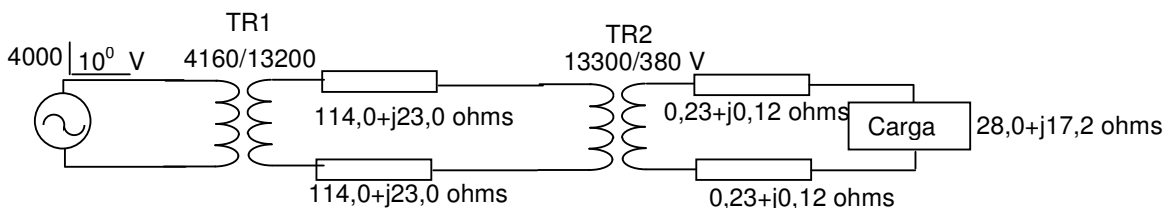


Fig. 11.14 – circuito do problema 11.7.

Respostas

- 11.3** $\dot{I}_C = 5,59 \angle -8,00^\circ \text{ A}$
 $\dot{V}_C = 113,5 \angle 30^\circ \text{ V}.$
- 11.4** a) $\dot{V}_C = 200,4 \angle 15,1^\circ \text{ V}.$
b) $\dot{I}_C = 15,1 \angle -29,9^\circ \text{ V}.$
c) $\dot{S}_C = 3020,2 \angle 45^\circ \text{ VA}; P_C = 2135,6 \text{ W}; Q_C = 2135,6 \text{ VAR}.$
d) $\text{FP} = 0,707.$
- 11.5** a) $\dot{V}_C = 188,2 \angle 0^\circ \text{ V}; \dot{I}_C = 184,5 \angle -11,3^\circ \text{ A}.$
b) $\dot{S} = 34731 \angle 11,3^\circ \text{ VA}; P = 34056 \text{ W}; Q = 6811 \text{ VAR}.$
c) $\dot{V}_{TR} = 6775 \angle 0^\circ \text{ VA}; \dot{S} = 41671 \angle 11,3^\circ \text{ VA}.$
- 11.6** a) $\dot{V}_{C1} = \dot{V}_{C2} = 240,6 \angle 4,60^\circ \text{ V}; \dot{I}_{C1} = 9,56 \angle -19,3^\circ \text{ A}; \dot{I}_{C2} = 15,0 \angle -15,9^\circ \text{ A};$
b) $\dot{S}_{C1} = 2300 \angle 23,9^\circ \text{ VA}; P_{C1} = 2102 \text{ W}; Q_{C1} = 932 \text{ VAR}.$
 $\dot{S}_{C2} = 3614 \angle 20,5^\circ \text{ VA}; P_{C1} = 3386 \text{ W}; Q_{C1} = 1264 \text{ VAR}.$
c) $\dot{V}_{TR} = 7980 \angle 4,55^\circ \text{ V}; \dot{S} = 41671 \angle 11,3^\circ \text{ VA}.$
 $\dot{S} = 5961 \angle 21,8^\circ \text{ VA}; P = 5536 \text{ W}; Q = 2210 \text{ VAR}.$
- 11.7** a) $\dot{V}_C = 354,9 \angle 10,2^\circ \text{ V}; \dot{I}_C = 10,8 \angle -21,4^\circ \text{ A};$
b) $\dot{S}_C = 3834 \angle 31,6^\circ \text{ VA}; P_C = 3267 \text{ W}; Q_C = 2007 \text{ VAR}.$
c) $\dot{V}_{PTR1} = 4000 \angle 10^\circ \text{ V}; \dot{I}_{PTR1} = 0,980 \angle -21,4^\circ \text{ A}.$
 $\dot{V}_{STR1} = 12692 \angle 10^\circ \text{ V}; \dot{I}_{STR1} = 0,309 \angle -21,4^\circ \text{ A}.$
 $\dot{V}_{PTR2} = 12634 \angle 10,1^\circ \text{ V}; \dot{I}_{PTR2} = 0,309 \angle -21,4^\circ \text{ A}.$
 $\dot{V}_{STR2} = 361 \angle 10,1^\circ \text{ V}; \dot{I}_{STR2} = 10,8 \angle -21,4^\circ \text{ A}.$
d) $\dot{S}_f = 3920 \angle 31,4^\circ \text{ VA}; P_f = 3346 \text{ W}; Q_f = 2042 \text{ VAR}.$