

**Atenção**

**É necessário o uso de régua, esquadro, compasso e transferidor.**

**OBJETIVOS**

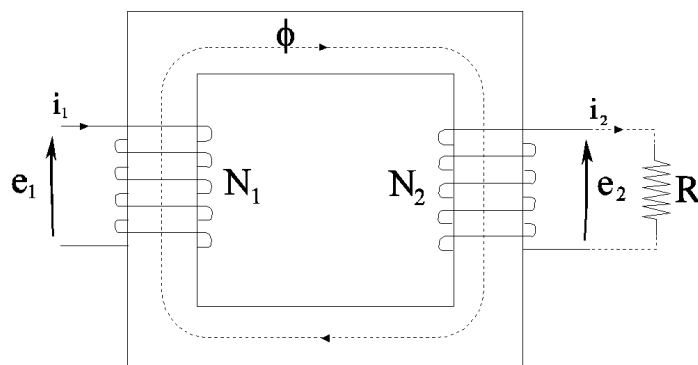
Estudar o princípio de funcionamento do transformador elétrico; verificar as leis de conversão e as características de operação do transformador e do autotransformador; testar a polaridade; obter os parâmetros do circuito elétrico equivalente; realizar a associação trifásica de transformadores monofásicos e analisar um caso desequilibrado; uma aplicação: o amplificador magnético.

**INTRODUÇÃO**

O transformador é uma máquina elétrica para conversão eletromagnética de energia que se distingue das demais por não produzir energia mecânica útil. Seu campo de aplicação inclui todo tipo de conversores elétricos, sistemas de transmissão e distribuição de energia, acoplamentos de diferentes sistemas elétricos, isolação entre fontes, casamento de impedâncias, condicionamento de sinais, etc.

**1 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO EM VAZIO**

O transformador pode ser entendido como o dispositivo eletromagnético elementar baseado na lei de Faraday no qual existe o circuito indutor (enrolamento primário) e o circuito induzido (enrolamento secundário), que são interligados magneticamente por um núcleo comum, como ilustrado na figura 1.



**Figura 1**

Ao se aplicar uma tensão senoidal  $e_1$  ao primário tem-se, pela lei de Faraday, que:

$$e_1 = -N_1 \cdot \frac{d}{dt} \phi \quad (1)$$

e, portanto, o fluxo  $\phi$  produzido terá forma cossenoidal.

Da mesma maneira tem-se no secundário a relação<sup>1</sup>:

$$e_2 = -N_2 \cdot \frac{d}{dt} \phi \quad (2)$$

- (i) Com base nas expressões (1) e (2) que relação se pode obter entre as tensões primária e secundária?
- (ii) Quais as condições necessárias para que esta relação se verifique na prática?

Genericamente, a relação entre a tensão do *primário* ( $V_1$ ) e a do *secundário* ( $V_2$ ) é denominada *relação de transformação* (RT):

$$RT = \frac{V_1}{V_2} \quad (3)$$

No caso de o transformador ser do tipo monofásico e ideal:

$$RT = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (4)$$

sendo  $(N_1 / N_2)$  conhecida como *relação de espiras*.

O transformador ideal caracteriza-se por não apresentar qualquer tipo de perda, tanto elétrica como magnética.

No caso de o transformador ser do tipo trifásico:

$$RT = \frac{V_{Lp}}{V_{Ls}} \quad (5)$$

onde  $V_{Lp}$  e  $V_{Ls}$  são as tensões de linha do *primário* e do *secundário*, respectivamente.

- (iii) Para o transformador monofásico, obter a *relação de transformação* para diferentes tensões aplicadas ao primário. **Comentar.**

Realizar as medidas  
com um único  
voltímetro

| $V_1$ (V)<br>alta tensão | $V_2$ (V)<br>baixa tensão | RT |
|--------------------------|---------------------------|----|
|                          |                           |    |
|                          |                           |    |
|                          |                           |    |
|                          |                           |    |

---

<sup>1</sup> Letras minúsculas indicam variáveis no tempo (por exemplo  $i(t)$ ,  $e(t)$ ) e letras maiúsculas indicam valores eficazes (por exemplo  $V_1$ ,  $I_1$ ).

## 2 - FUNCIONAMENTO SOB CARGA

Como vimos, mesmo que o secundário esteja em vazio (sem carga), haverá corrente no primário devida à corrente de magnetização do núcleo, responsável pela f.m.m. que sustenta o fluxo. Essa f.m.m. de magnetização vale:

$$\mathfrak{S} = fmm = N_1 \cdot i_{1m} = \mathfrak{R} \cdot \phi \quad (6)$$

A corrente de magnetização ( $i_{1m}$ ) é proporcional à relutância ( $\mathfrak{R}$ ) do circuito magnético.

Ao se conectar uma carga resistiva ao *secundário*, pode-se constatar que há um aumento na magnitude da corrente no *primário*. Porque isso ocorre, se os dois circuitos estão eletricamente isolados?

A interpretação da lei de Faraday-Lenz, no caso, é a seguinte: o campo produzido pela corrente da carga  $i_2$  provoca um efeito desmagnetizante, ou seja,  $i_2$  produz um fluxo que tende a se opor ao fluxo criado pela corrente no primário  $i_1$ . Há então uma reação do primário através de um aumento da corrente  $i_1$  e consequente aumento da f.m.m. para compensar o efeito desmagnetizante da carga. A condição de equilíbrio é restabelecida quando o fluxo associado à tensão do primário é reposto, incluindo o efeito da carga. Nessas condições a f.m.m. total será dada por:

$$\mathfrak{S} = N_1 \cdot (i_{1m} + i_{1c}) - N_2 \cdot i_2 = \mathfrak{R} \cdot \phi \quad (7)$$

onde  $i_{1c}$  corresponde à componente da corrente no primário devida à carga ( $i_2$ ) no secundário.

Comparando (6) e (7), percebe-se que a carga não contribui com f.m.m. líquida, ou seja, que:

$$N_1 \cdot i_{1c} - N_2 \cdot i_2 = 0 \quad (8)$$

Devido à alta permeabilidade do núcleo ferromagnético, a corrente de magnetização é pequena comparada com a corrente da carga ( $i_{1m} \ll i_{1c}$ ) e portanto, pode-se assumir que  $i_1 = i_{1c}$ , resultando a relação das correntes:

$$N_1 \cdot i_1 = N_2 \cdot i_2 \quad \text{ou} \quad \frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (9)$$

ou seja, a relação das correntes se aproxima da relação inversa das espiras.

(iv) Quais as condições necessárias para que a potência aparente suprida pela fonte ao primário, seja exatamente a potência aparente que o secundário entrega à carga?

(v) Mostre que, satisfeitas estas condições, também se chega na equação (9).

(vi) A partir da relação de transformação, deduza uma expressão que permita obter o valor da *impedância refletida* do secundário para o primário e vice-versa.

- (vii) Dispondo de um resistor conhecido, proponha um procedimento experimental para verificar essa relação de reflexão de impedância.
- (viii) Para o resistor disponível ( $22\ \Omega$ ) calcule as grandezas elétricas necessárias para realizar esse procedimento experimental. Sugere-se aplicar tensão reduzida para não sobrecarregar o transformador. Comente o erro observado.

## 2.1 - RENDIMENTO

O rendimento, expresso em porcentagem, pode ser obtido através de:

$$\eta = \frac{\text{potência ativa de saída}}{\text{potência ativa de entrada}} \cdot 100\% \quad (10)$$

## 2.2 - REGULAÇÃO DE TENSÃO

A tensão secundária como função da corrente de carga  $[V_2 \times I_2]$  fornece a *curva de regulação de tensão* do transformador. Percentualmente, a regulação de tensão de um transformador pode ser obtida por:

$$\text{Regulação (\%)} = \frac{V_{2(\text{vazio})} - V_{2(\text{plena carga})}}{V_{2(\text{plena carga})}} \cdot 100\% \quad (11)$$

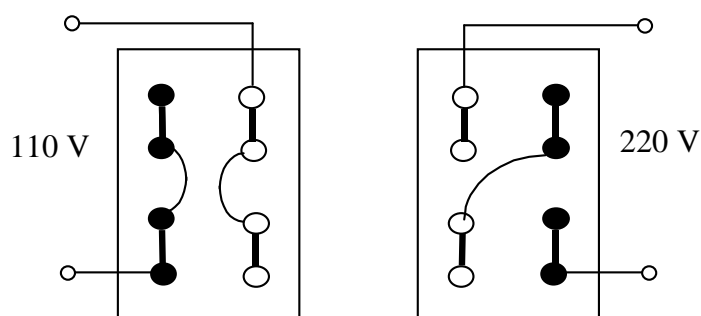
## 2.3 - ENSAIO DO TRANSFORMADOR SOB CARGA

Neste item serão analisadas algumas características de operação de um transformador monofásico sob diversas condições de carga (curvas de carga).

- (ix) Efetue a montagem indicada na figura 2. O esquema de conexões do transformador é mostrado na figura 3.



Figura 2



**Figura 3**  
**Esquema das ligações das bobinas do transformador 110/220 V - 1 kVA**

Calcule o valor nominal da corrente secundária para não ultrapassá-la durante o ensaio.

|               |     |
|---------------|-----|
| $I_2$ nominal | (A) |
|---------------|-----|

- (x) Com o secundário em vazio ( $I_2 = 0$ ), aplique tensão de **110 V** no primário e preencha a primeira linha da tabela 1. Depois, mantenha constante a tensão no primário (110 V) e complete a tabela 1 variando a carga ( $I_2$ ) no secundário.

**TABELA 1**

| Lado de baixa tensão<br><b>PRIMÁRIO</b> |           |               | Lado de alta tensão<br><b>SECUNDÁRIO</b> |           |           |
|---|-----------|---------------|--|-----------|-----------|
| $I_1$ [A]                               | $P_1$ [W] | $\cos \phi_1$ | $V_2$ [V]                                | $I_2$ [A] | $P_2$ [W] |
|   |           |               |  | 0         |           |
|   |           |               |  |           |           |
|   |           |               |  |           |           |
|   |           |               |  |           |           |
|   |           |               |  |           |           |
|   |           |               |  |           |           |
|   |           |               |  |           |           |
|   |           |               |  |           |           |
|   |           |               |  |           |           |
|   |           |               |  |           |           |
|   |           |               |  |           |           |

(\*)  $V_1 = 110 \text{ V}$  - constante

- (xi) Obter e comentar:
- a curva de regulação de tensão  $[V_2 \times I_2]$  a partir dos dados obtidos.
  - a curva de rendimento  $[\eta \times I_2]$ .
  - a regulação do transformador para o ponto de operação próximo do nominal.
  - a curva de variação do fator de potência no primário com o aumento da carga  $[\cos \phi_1 \times I_2]$ .

### 3 - OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DO TRANSFORMADOR

Como o *transformador real* apresenta dispersão, saturação, histerese e até capacitâncias parasitas, o seu comportamento se afasta um pouco das relações ideais. Para avaliar o seu desempenho sob diferentes condições de operação, é necessário conhecer os parâmetros que permitem estabelecer um modelo para análise. Normalmente opta-se por um *circuito elétrico equivalente* que possibilita o estudo do comportamento e do desempenho elétrico de um transformador através de relações de circuitos.

Partindo da hipótese de que um *transformador real* corresponde a um *transformador ideal*, acrescido da corrente de magnetização, do efeito de dispersão, das perdas ôhmicas e da histerese, pode-se representar todos esses efeitos através do circuito ilustrado na figura 4.

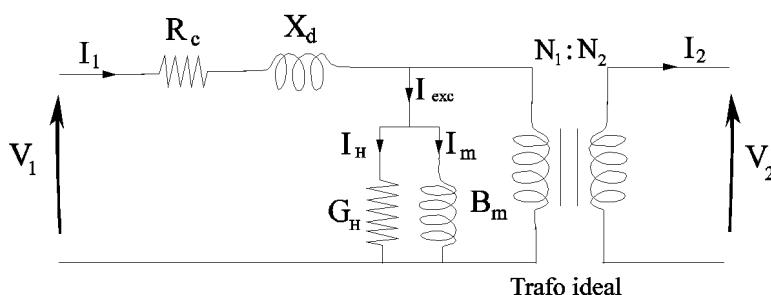


Figura 4

Na figura 4:

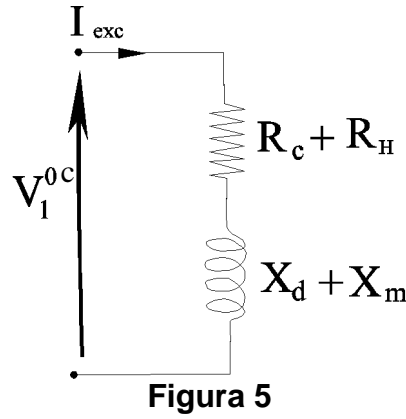
- $B_m$  → susceptância de magnetização associada à corrente de magnetização;
- $G_H$  → condutância representando as perdas no núcleo;
- $X_d$  → reatância de dispersão;
- $R_c$  → resistência ôhmica dos enrolamentos.

A rigor, esses parâmetros representam os efeitos combinados do primário e do secundário e poderiam ser representados separadamente. Em geral não é necessário conhecer os parâmetros separadamente, sendo mais simples agrupá-los no primário ou no secundário.

#### 3.1 - ENSAIO EM VAZIO E ENSAIO EM CURTO-CIRCUITO

Estas são as denominações de dois tipos de ensaios realizados em uma *máquina elétrica* com o objetivo de se determinar os parâmetros do respectivo circuito elétrico equivalente.

Com base na figura 4, com o secundário em vazio,  $I_1$  será a própria corrente de excitação  $I_{exc}$ . Nessas condições, o circuito equivalente corresponde ao da figura 5.



Nas figuras 4 e 5:

$$R_H = \Re\{Y_{exc}^{-1}\} = \Re\{(G_H + jB_m)^{-1}\} = G_H / (G_H^2 + B_m^2)$$

$$X_m = \Im\{Y_{exc}^{-1}\} = \Im\{(G_H + jB_m)^{-1}\} = -B_m / (G_H^2 + B_m^2)$$

Deve-se notar também que, normalmente, a resistência ôhmica e a reatância de dispersão são desprezados no ensaio em vazio, permitindo a determinação direta dos parâmetros do ramo de excitação. Isto ocorre quando  $R_H \gg R_c$  e  $X_m \gg X_d$ . Caso contrário, o circuito da figura 5 deve ser usado.

No ensaio em vazio pode-se medir as perdas e a impedância de entrada sob tensão nominal  $V_1^{OC} = V_{1n}$ :

$$P_v = (R_c + R_H) \cdot I_{exc}^2 \quad (\text{perdas em vazio})$$

$$|Z_{OC}| = \left| \frac{V_1^{OC}}{I_{exc}} \right| = |(R_c + R_H) + j(X_d + X_m)| \quad (\text{impedância vista em vazio})$$

e a partir daí obter os valores compostos  $(R_c + R_H)$  e  $(X_d + X_m)$ .

**(xii)** Para realizar o ensaio em vazio, qual dos lados (alta ou baixa tensão) será conectado à fonte? Por que?

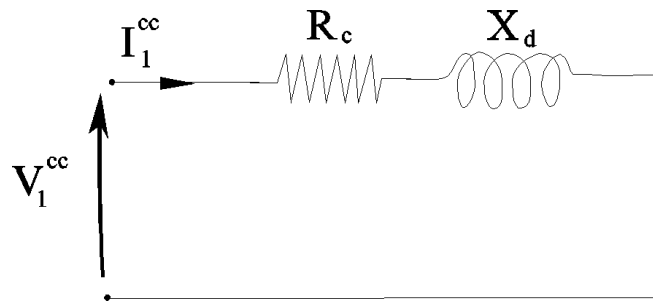
**(xiii)** Faça o ensaio em vazio do transformador e calcule os valores indicados.

No caso do ensaio em curto (secundário curto-circuitado), aparecerá uma corrente significativa no secundário, mesmo para baixos valores de  $V_1$ . Isso porque sob curto o fluxo pode ser reduzido quase a zero, já que:

$$V_2 = N_2 \cdot \frac{d}{dt} \phi = 0$$

e portanto  $\phi \rightarrow 0$ .

O curto-circuito no secundário se reflete como curto-circuito no primário do *transformador ideal* de modo que, nessa condição, o circuito equivalente corresponde ao da figura 6.



**Figura 6**

Nesse ensaio aumenta-se  $V_1^{cc}$  até que  $I_1^{cc}$  atinja o valor nominal ( $I_{1n}$ ) e mede-se a potência de perdas e a impedância de entrada:

$$P_{cc} = R_c \cdot I_{1n}^2 \quad (\text{perdas ôhmicas sob curto})$$

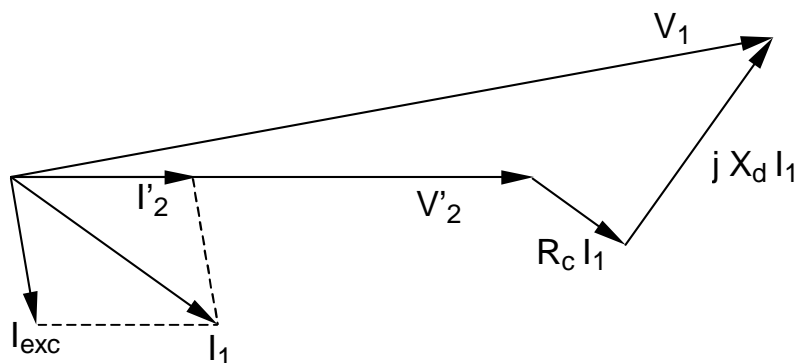
$$|Z_{cc}| = \left| \frac{V_1^{cc}}{I_1^{cc}} \right| = |R_c + jX_d| \quad (\text{impedância de curto})$$

Uma vez obtidos os valores de  $R_c$  e  $X_d$  pode-se calcular  $R_H$  e  $X_m$  ou  $G_H$  e  $B_m$  e completar o circuito elétrico equivalente do transformador.

- (xiv) Para realizar o ensaio em curto-circuito, qual dos lados (alta ou baixa tensão) será conectado à fonte? Por que?
- (xv) Faça o ensaio em curto-circuito do transformador e calcule todos os parâmetros referidos ao lado de baixa tensão.

### 3.2 - APLICAÇÃO DO CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE

O circuito elétrico equivalente possibilita o cálculo de diversas grandezas características de operação do transformador como, por exemplo: rendimento, regulação de tensão, fator de potência, etc., e permite também obter o diagrama fasorial como ilustrado na figura 7.



**Figura 7**

Diagrama fasorial “visto pelo primário”

**Questão:** A que tipo de carga conectada ao secundário do transformador corresponde o diagrama acima? Justifique.

- (xvi) Utilizando o circuito equivalente obtido anteriormente, calcule o rendimento, a

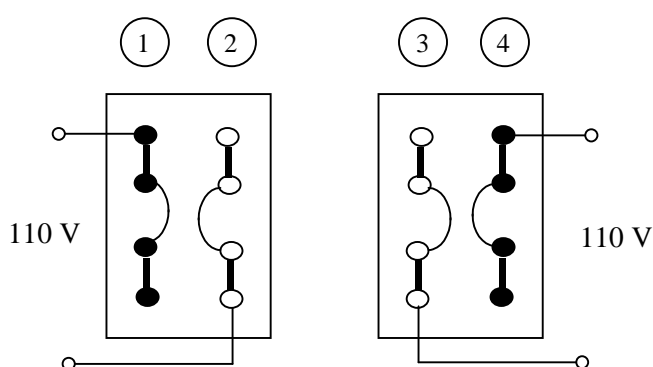


regulação de tensão, o fator de potência no primário e desenhue, **em escala**, o diagrama fasorial das tensões e correntes para o ponto de operação ( $V_2, I_2$ ) próximo do nominal obtido na Tabela 1. Compare com os valores obtidos no item **(xi)**.

#### 4 - POLARIDADE DOS ENROLAMENTOS

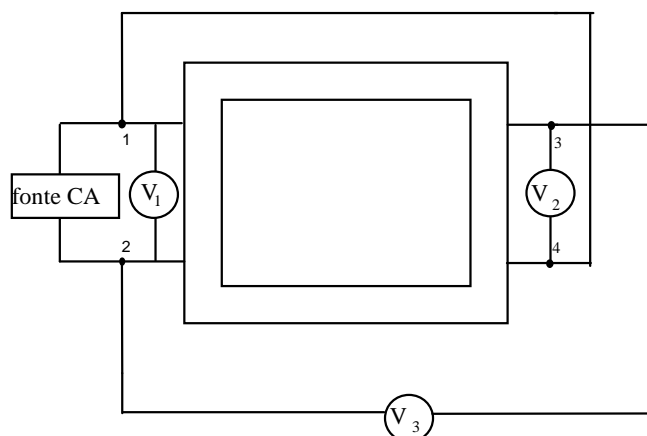
O conhecimento da polaridade dos terminais das bobinas em um transformador é fundamental quando for necessário, por exemplo, conectar transformadores em paralelo ou ligar um terminal da bobina primária ao da secundária para a configuração de autotransformador.

- (xvii)** Conecte os enrolamento do transformador na configuração 110 V / 110 V, conforme mostra a figura 8.

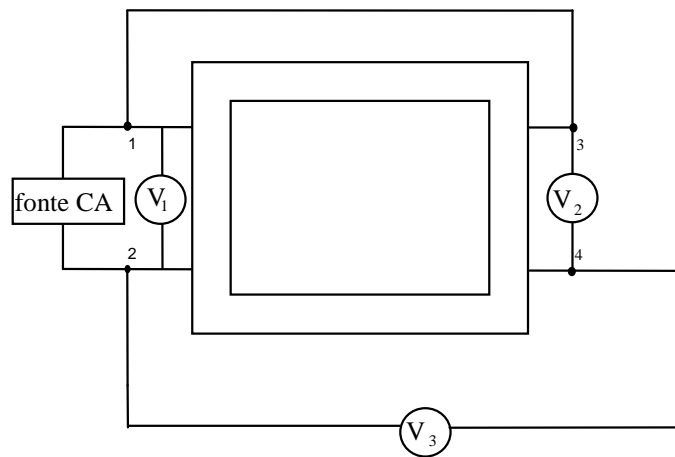


**Figura 8**

Faça as conexões indicadas nas figuras 9 e 10, preenchendo a tabela 2 para uma tensão de 50 V aplicada ao primário.



**Figura 9**



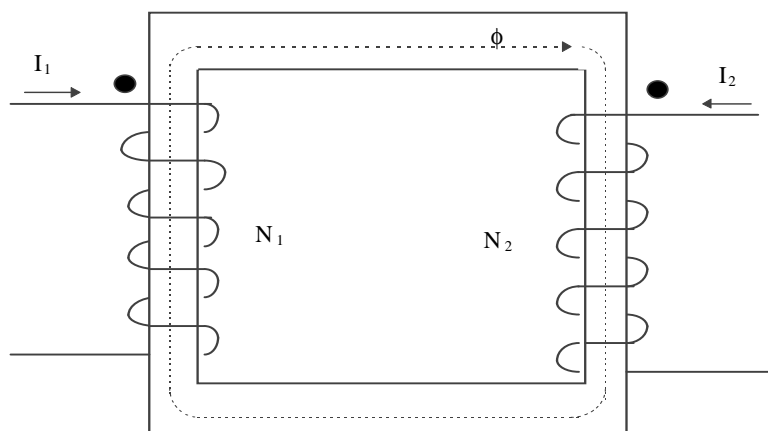
**Figura 10**

**TABELA 2**

|           | Figura 9 | Figura 10 |
|-----------|----------|-----------|
| $V_1$ [V] |          |           |
| $V_2$ [V] |          |           |
| $V_3$ [V] |          |           |

**(xviii)** Identifique a associação aditiva e a subtrativa. Justifique.

Uma notação usual para a identificação da polaridade é mostrada na figura 11.

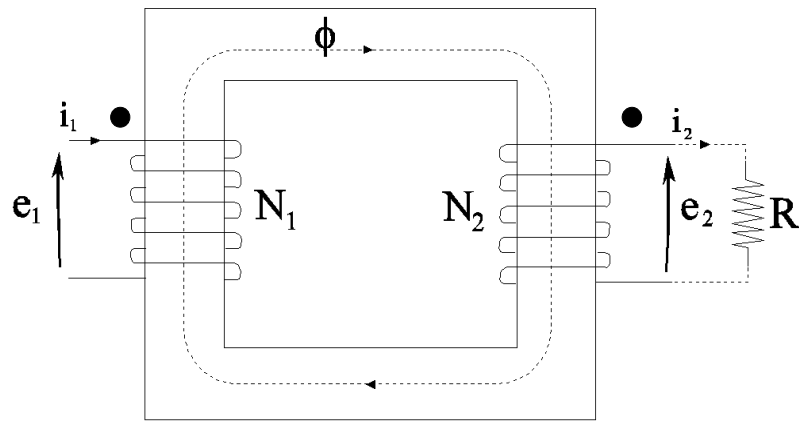


**Figura 11**

Essa notação sugere que as correntes que circulam pelas bobinas, **entrando** pelos terminais marcados, geram fluxos magnéticos no **mesmo sentido**.

**(xix)** Nas figuras 9 e 10, desenhe as espiras dos enrolamentos e identifique a polaridade.

Considere o transformador mostrado na figura 12.

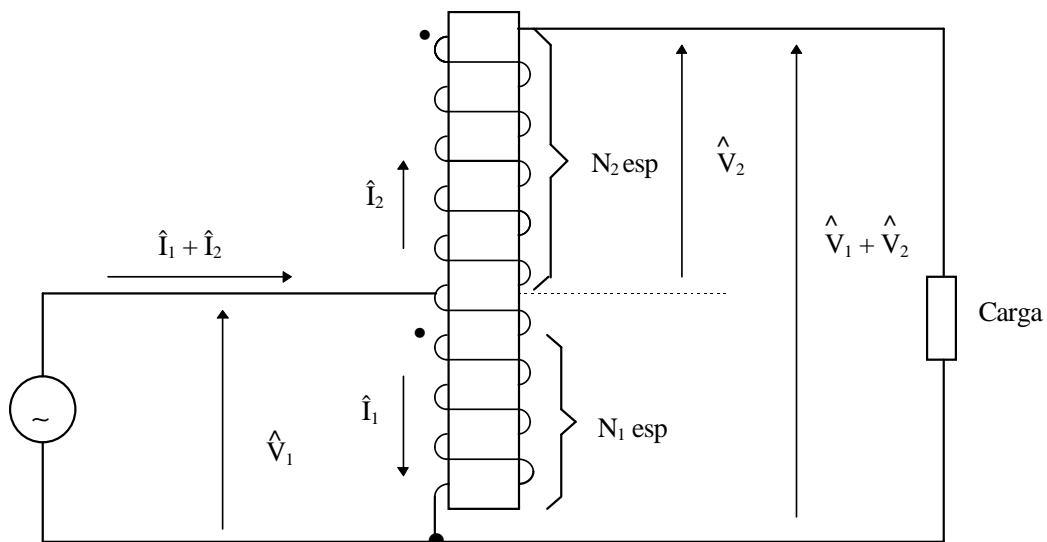


**Figura 12**

**(xx)** Verifique se todas as indicações estão consistentes. Justifique.

## 5 - AUTOTRANSFORMADOR

Quando o desacoplamento elétrico entre o primário e o secundário não é necessário, pode-se aumentar a eficiência do transformador conectando-se os enrolamentos secundário e primário conforme indicado na figura 13 (polaridade aditiva). A conexão com polaridade subtrativa também é possível.



**Figura 13**

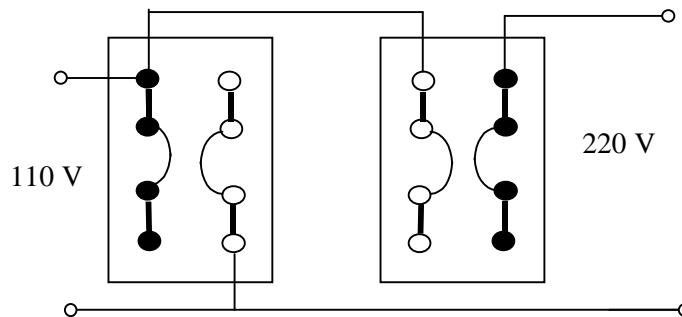
Esta nova configuração é conhecida como *autotransformador*. Um exemplo é a bobina de ignição em um automóvel.

**(xxi)** Deduza uma expressão que relacione a potência nominal ( $S_n$ ) do transformador convencional com a potência aparente no secundário do autotransformador com polaridade aditiva.

**(xxii)** Que se pode concluir em relação ao transformador convencional?

## 5.1 - CARACTERÍSTICAS DE OPERAÇÃO DO AUTOTRANSFORMADOR

Conectando os enrolamentos primário e secundário do transformador monofásico **110/110 V** conforme indicado na figura 14, ele passa a operar como autotransformador.

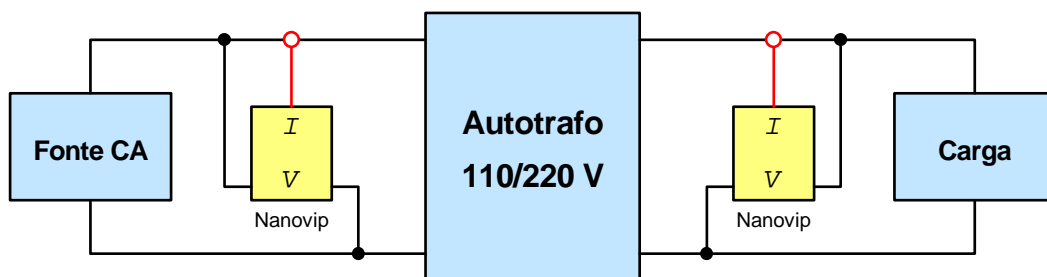


**Figura 14**

Dependendo da polaridade, a tensão na carga poderá ser **0 V (zero Volts)** (polaridade subtrativa) ou **220 V** (polaridade aditiva) para uma tensão da fonte de **110 V**.

**(xxiii)** Para a realização do experimento:

- conecte os enrolamentos como autotransformador com **POLARIDADE ADITIVA**.
- faça a ligação conforme indicado na figura 15.



**Figura 15**

- com o secundário em vazio e conforme indicado na tabela 3, aplique tensão no primário e preencha a primeira linha da tabela.
- mantendo constante a tensão ajustada no primário, complete a tabela 3 para variações da carga ( $I_2$ ).

TABELA 3

| Lado de baixa tensão<br>PRIMÁRIO |           |               | Lado de alta tensão<br>SECUNDÁRIO |           |           |
|----------------------------------|-----------|---------------|-----------------------------------|-----------|-----------|
| $I_1$ [A]                        | $P_1$ [W] | $\cos \phi_1$ | $V_2$ [V]                         | $I_2$ [A] | $P_2$ [W] |
|                                  |           |               |                                   | 0         |           |
|                                  |           |               |                                   |           |           |
|                                  |           |               |                                   |           |           |
|                                  |           |               |                                   |           |           |
|                                  |           |               |                                   |           |           |
|                                  |           |               |                                   |           |           |
|                                  |           |               |                                   |           |           |
|                                  |           |               |                                   |           |           |
|                                  |           |               |                                   |           |           |
|                                  |           |               |                                   |           |           |
|                                  |           |               |                                   |           |           |
|                                  |           |               |                                   |           |           |
|                                  |           |               |                                   |           |           |

(\*)  $V_1$  - ajustar de forma que  $V_2$  em vazio seja igual ao da tabela 1:  $V_1 =$     
V

(xxiv) Obter:

- a curva de regulação de tensão  $[V_2 \times I_2]$  a partir dos dados obtidos, no mesmo gráfico do item (xi).
- a curva de rendimento  $[\eta \times I_2]$ , no mesmo gráfico do item (xi).
- a regulação do autotransformador para o ponto de operação próximo do nominal.
- a curva de variação do fator de potência no primário com o aumento da carga  $[\cos \phi_1 \times I_2]$  no mesmo gráfico do item (xi).

(xxv) Compare estes resultados com os obtidos no ensaio do transformador realizados no item (xi).

**Atenção**

**É necessário o uso de régua, esquadro, compasso e transferidor.**

## 6 - TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

Uma das principais aplicações dos transformadores está nos sistemas de potência, elevando ou abaixando o nível de tensão para a transmissão ou distribuição da energia elétrica. Em geral esses sistemas são trifásicos e equilibrados. Pode-se construir transformadores com núcleo trifásico ou associar transformadores com núcleos monofásicos. Nos dois casos, os enrolamentos podem ser associados em *estrela* (Y) ou em *delta* ( $\Delta$ ). Se houver três enrolamentos por fase pode-se ainda obter uma associação *zig-zag* (Z), que é uma versão estrela (Y) composta. A escolha da associação adequada depende de diversos fatores como: acesso a neutro, bitola dos condutores por fase, sistema de aterramento, nível de isolamento, defasagem angular requerida, etc. O transformador com núcleo trifásico leva vantagem sobre a associação ou banco de transformadores monofásicos, devido à economia de ferro no núcleo: como os fluxos das três fases somam zero a todo instante, pode-se eliminar o caminho de retorno do fluxo, o que leva a uma estrutura magnética plana com uma perna do núcleo para cada fase (figura 16).

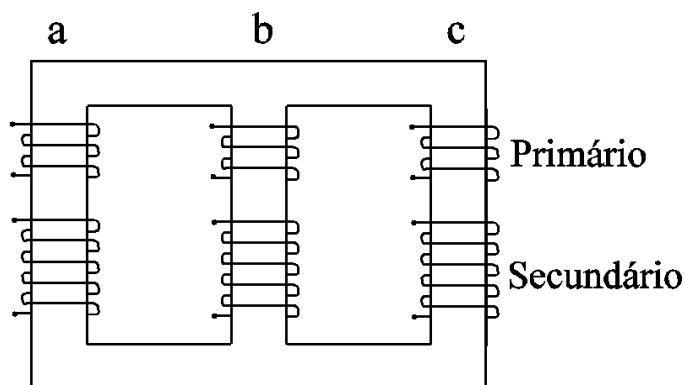
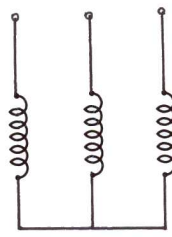


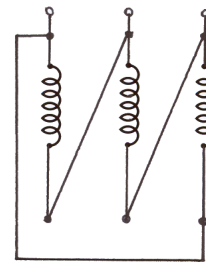
Figura 16

### 6.1 - CONEXÃO EM Y OU $\Delta$

A ligação em Y ou  $\Delta$  dos enrolamentos é estabelecida através da conexão dos seus terminais, conforme mostra a figura 17.



Conexão Y



Conexão Δ

**Figura 17**

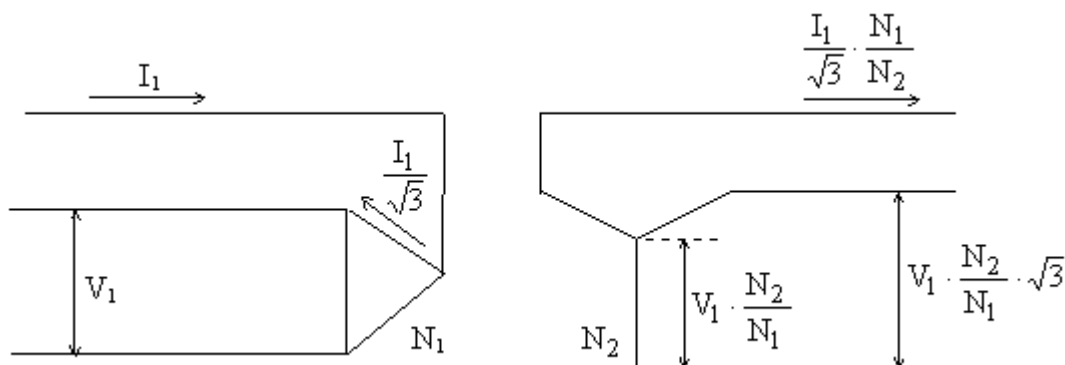
Para fazer corretamente essa conexão, é fundamental conhecer a polaridade relativa dos enrolamentos. Qualquer inversão irá colocar duas fases em curto-circuito ou desequilibrar o circuito magnético.

São possíveis quatro combinações das ligações dos enrolamentos de um transformador trifásico: Y-Y, Y-Δ, Δ-Y e Δ-Δ.

**(xxvi)** Dessas quatro ligações qual é a menos utilizada e por quê?

Em cada combinação é necessário verificar como as correntes e tensões primárias se relacionam com as correntes e tensões secundárias. Lembrar que em uma ligação Y a tensão de linha é igual a  $\sqrt{3}$  vezes a tensão de fase e em uma ligação Δ a corrente de linha é igual a  $\sqrt{3}$  vezes a corrente de fase.

Na figura 18 tem-se as indicações das tensões e das correntes em uma conexão Δ-Y.



**Figura 18**

Exemplificando:

Considere  $N_1 = 1000$  espiras e  $N_2 = 100$  espiras.

Se  $V_1 = 1270V$  teremos na bobina secundária uma tensão de fase igual a 127V e uma tensão de linha igual a 220V.

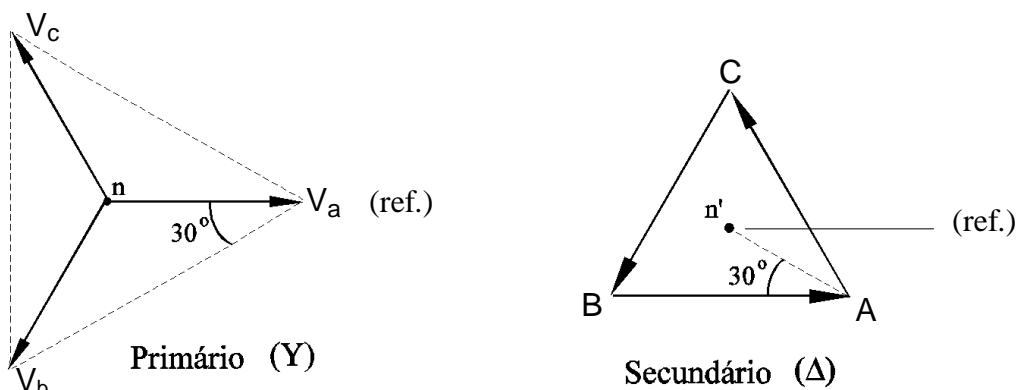
Se  $I_1 = 11A$  teremos na bobina primária uma corrente de fase igual a 6,35A e na bobina

secundária uma corrente de linha igual a 63,5A.

Realize as operações abaixo indicadas tanto para o primário como para o secundário e tire as suas próprias conclusões.

$$\begin{aligned} |S_{1\phi}| &= |V_f| \cdot |I_f| \\ |S_{3\phi}| &= \sqrt{3} \cdot |V_L| \cdot |I_L| \end{aligned}$$

Uma característica da associação Y- $\Delta$  é o deslocamento angular de  $\pm 30^\circ$  que resulta entre as *tensões terminais* correspondentes do primário e do secundário. O sentido da defasagem depende da sequência das fases. Esse deslocamento pode ser percebido através de um diagrama fasorial, como o mostrado na figura 19.



**Figura 19**

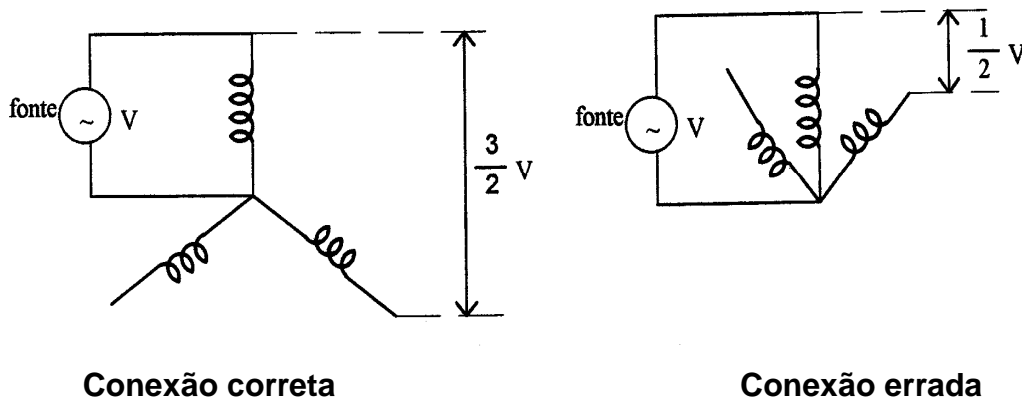
A tensão de linha  $V_{AB}$  do secundário está atrasada de  $30^\circ$  em relação à tensão correspondente  $V_{ab}$  do primário. Se trocarmos a sequência das fases, a defasagem muda de sinal. Portanto, é necessário tomar cuidado com as defasagens quando, por exemplo, deseja-se conectar dois transformadores trifásicos em paralelo.

## 6.2 - CONEXÃO EM Y

Para o caso de *associação trifásica de transformadores monofásicos*, pode-se testar a polaridade de cada transformador separadamente, conforme visto anteriormente.

Para o caso de *núcleo trifásico*, é preciso testar a polaridade relativa dos três enrolamentos do primário e do secundário entre si. Para o teste do primário, liga-se as bobinas em Y e aplica-se uma tensão de teste  $V$  na fase da perna central do núcleo (figura 20).





**Figura 20**

Com um voltímetro verificam-se as tensões resultantes nos outros terminais. Se a leitura for  $V/2$  a respectiva fase está invertida (Y com uma perna invertida) e se for  $3V/2$  a conexão está correta.

**(xxvii)** Explique essas relações.

Para o secundário pode-se fazer o mesmo teste do primário, porém isso não garante a mesma sequência de fases para os dois lados. Por isso, é melhor aplicar o teste do transformador monofásico, ligando em série os enrolamentos da *mesma perna*, aplicar a tensão de teste  $V$  no primário e verificar se resulta polaridade aditiva ou subtrativa, marcando os terminais correspondentemente.

Um procedimento alternativo corresponde à conexão das três bobinas em série, aplicando-se uma tensão  $V$  ao conjunto. A polaridade estará correta se as tensões sobre cada bobina forem iguais a  $V/3$ . A vantagem deste teste é que pode ser averiguada também a polaridade do secundário.

### 6.3 - CONEXÃO EM $\Delta$

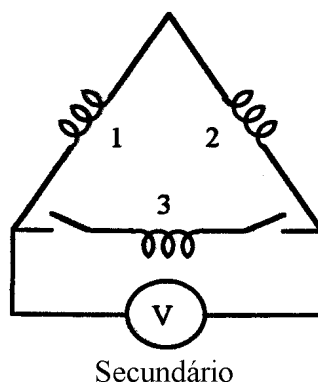
Para a conexão  $\Delta$  do secundário é necessário conhecer a polaridade de cada enrolamento antes de fechar o  $\Delta$ . Qualquer ligação incorreta ocasionará um curto-circuito no transformador.

Para realizar a conexão  $\Delta$  deve-se conectar as bobinas secundárias 1 e 2 como indicado na figura 21. Ao se aplicar ao primário tensão de fase  $V_{Fp}$ , deve resultar entre os extremos livres das bobinas 1 e 2 a mesma tensão das bobinas 1 e 2:

$$V_{Ls} = (N_2 / N_1) \cdot V_{Fp}$$

Caso a ligação esteja errada, a tensão será  $\sqrt{3} \cdot V_{Ls}$ . Neste caso deve-se inverter uma das bobinas.

Em seguida, ligue um dos terminais da bobina 3 ao terminal livre da bobina 2, deixando o outro terminal ainda aberto. Se a ligação estiver correta, deve-se medir uma tensão nula entre os terminais livres das bobinas 1 e 3. Esta tensão pode não ser exatamente zero devido ao efeito da terceira harmônica. Entretanto, se a ligação estiver errada, ter-se-á  $2 \cdot V_{Ls}$ .



**Figura 21**

**(xxviii)** Para o transformador com *núcleo trifásico*:

- realize e descreva o teste de polaridade para o primário em Y (figura 20).
- realize e descreva o teste de polaridade para o secundário em  $\Delta$  (figura 21).
- com base na tensão nominal das bobinas do transformador trifásico, calcule sua relação de transformação, conforme definido em (5).
- aplique tensão nominal no primário e obtenha a relação de transformação em vazio. Compare com o valor esperado.
- através do osciloscópio observe a defasagem entre tensões correspondentes do primário e do secundário.

**(xxix)** Para três transformadores monofásicos 220/110 V com as bobinas de 220 V em Y:

- justifique o fato de não ser necessário o teste de polaridade para a conexão Y.
- realize e descreva o teste de polaridade para o secundário em  $\Delta$  (figura 21).
- com base na tensão nominal das bobinas do transformador trifásico, calcule sua relação de transformação, conforme definido em (5).
- aplique tensão nominal no primário e obtenha a relação de transformação em vazio. Compare com o valor esperado.

#### **6.4 - ENSAIO SOB CARGA DESEQUILIBRADA**

**(xxx)** Para os transformadores monofásicos conectados em Y-Y (190/381 V), **sem neutro**:

- ajuste o Variac 3 $\phi$  para obter tensões nominais no primário do banco trifásico.
- meça as tensões secundárias de fase e de linha resultantes e trace o respectivo diagrama fasorial **em escala**.

- conecte uma lâmpada de 100W/230V entre uma fase e o neutro no secundário do banco trifásico.
- meça as tensões secundárias de fase e de linha resultantes e trace o respectivo diagrama fasorial **em escala**.
- explique o fato de que essa associação não é capaz de suprir tensão nominal à lâmpada.
- como se resolve esse problema de modo que a lâmpada acenda normalmente? Justifique. Teste a solução proposta e meça as tensões secundárias de fase e de linha resultantes.

## 7 - AMPLIFICADOR MAGNÉTICO

(xxxi) Dispondo de dois transformadores monofásicos 110/220V e uma lâmpada 100W/230V:

- conecte as bobinas de baixa tensão em série (**polaridade aditiva**) com a lâmpada.
- conecte as bobinas de alta tensão em série (**polaridade subtrativa**).
- verifique e justifique porque resulta tensão secundária total praticamente zero quando ao circuito formado pelas bobinas em série com a lâmpada é aplicada uma tensão de 220V.
- uma vez que as bobinas de alta tensão estão isoladas eletricamente do circuito primário, pode-se conectá-las a um gerador de sinais para modular o fluxo magnético e ajustar um nível c.c. de alguns milivolts, podendo-se observar o efeito de controle da luminosidade da lâmpada.
- variando o nível c.c. do gerador de sinais, preencha a tabela a seguir.

| TABELA 4       |                 |                   |                   |
|----------------|-----------------|-------------------|-------------------|
| $V_{c.c.}$ [V] | $I_{c.c.}$ [mA] | $V_{lâmpada}$ [V] | $I_{lâmpada}$ [A] |
| 0              |                 |                   |                   |
|                |                 |                   |                   |
|                |                 |                   |                   |
|                |                 |                   |                   |

- calcule o ganho de potência observado:

$$G = \frac{\Delta P_{lâmpada}}{\Delta P_{sinal}} \quad (12)$$

- pode-se também produzir a modulação da luminosidade da lâmpada adicionando uma oscilação de baixa frequência (< 20Hz) ao nível c.c. do gerador de sinal e assim observar o efeito de cintilação luminosa resultante. Realize o ensaio e descreva o que for observado.

(xxxii) Explique o princípio de funcionamento do amplificador magnético.

## 8 - ASPECTOS PRÁTICOS

- (xxxiii) Propor um esquema para a conexão de uma carga trifásica a uma rede elétrica com apenas duas fases (mesmo valor eficaz e defasadas de  $120^\circ$ ), dispondo apenas de dois transformadores monofásicos idênticos com relação de espiras 1:1.
- (xxxiv) Dado que a demanda de energia elétrica (carga) em um período de 24 horas não é constante, principalmente em áreas residenciais onde a carga é máxima no horário de pico, comente sobre o rendimento dos transformadores trifásicos instalados nas redes de distribuição de energia elétrica.

## 9 - TRANSFORMADORES ESPECIAIS

*VARIAC* - é um autotransformador com relação de espiras variável, usado em aplicações onde se necessita regular a tensão utilizando apenas uma pequena parte da potência para conversão eletromagnética. Portanto, é um transformador com conexão elétrica entre o primário e o secundário.

*TRANSFORMADOR DE PULSO* - é usado em circuitos chaveados eletronicamente. Sua função é isolar o circuito de controle do circuito de potência.

*TRANSFORMADORES PARA MEDIÇÃO DE POTENCIAL (TP) OU DE CORRENTE (TC)* - são transformadores úteis para a medição de tensões e correntes em instalações elétricas em alta tensão como, por exemplo em subestações.

## 10 - CONTEÚDO DO RELATÓRIO

Apresente uma descrição resumida de cada montagem e do ensaio realizado, incluindo deduções, tabelas, gráficos, comparações, conclusões, etc. relativas aos seguintes itens indicados no roteiro:

| Seção | 1   | 2    | 3    | 4     | 5     | 6      | 7     | 8      |
|-------|-----|------|------|-------|-------|--------|-------|--------|
| Itens | iii | vi   | xiii | xvii  | xxiii | xxvi   | xxxi  | xxxiii |
|       |     | vii  | xv   | xviii | xxiv  | xxviii | xxxii | xxxiv  |
|       |     | viii | xvi  | xix   | xxv   | xxix   |       |        |
|       |     | x    |      | xx    |       | xxx    |       |        |
|       |     | xi   |      |       |       |        |       |        |