

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA  
CONVERSÃO ELETROMECÂNICA DE ENERGIA A

DJONATHAN LUIZ DE OLIVEIRA QUADRAS (15200695)

TRABALHO 2

FLORIANÓPOLIS  
2021

## Introdução

O presente trabalho as respostas das questões 1.7, 1.8, 1.9, 1.10, 1.13, 1.14, 1.15 e 1.16 presentes na versão 6<sup>ta</sup> da apostila desenvolvida pelo Professor Doutor Renato Lucas Pacheco. O trabalho foi inteiramente desenvolvido em linguagem RMarkdown. Os códigos fonte para a sua elaboração contam em anexo. Importante: o padrão de numeração utilizado é do formato americano (com separação decimal utilizando ponto e não vírgula).

## Questão 1.7

Transformador de  $1.1 \times 10^5 \text{VA}$ , 4400/440, 60Hz. Se três transformadores iguais ao especificado forem ligados na configuração estrela/delta ( $Y - \Delta$ ) e alimentados a partir de um gerador de tensão trifásica equilibrada de sequência positiva, com valor eficaz (de linha) igual a raiz quadrada de três vezes a tensão nominal do lado primário do transformador (lado de alta tensão), qual a tensão entre os terminais abertos (em módulo e ângulo) em cada um dos casos mostrados a seguir? Explicar cuidadosamente os resultados, concluindo se a ligação delta pode ou não ser fechada e por quê!! Para esta análise, os transformadores podem ser considerados ideais!

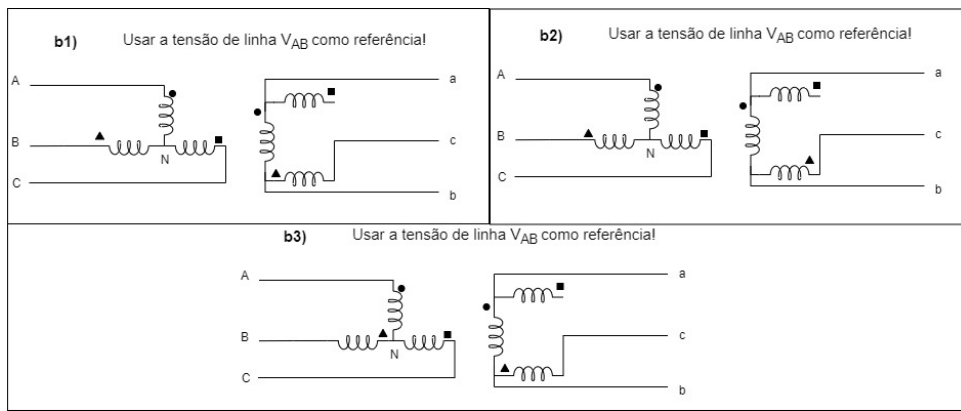


Figura 1: Enunciado

## Resolução

De acordo com o enunciado, o sistema é alimentado por um gerador com tensão eficaz (de linha) de 7621.02V. Com isso, podemos concluir que as tensões de linha em Y são

$$\begin{cases} V_{AB} = 7621.02 \angle 0^\circ V \\ V_{BC} = 7621.02 \angle -120^\circ V \\ V_{CA} = 7621.02 \angle 120^\circ V \end{cases}$$

E como para sistemas balanceados temos que  $V_L = \sqrt{3}V_P$  (com defasamento de  $30^\circ$ ), temos que

$$\begin{cases} V_{AN} = 4400 \angle -30^\circ V \\ V_{BN} = 4400 \angle -150^\circ V \\ V_{CN} = 4400 \angle 90^\circ V \end{cases}$$

Dessa forma, é possível calcular as tensões de linha no circuito em  $\Delta$ . Para cada um dos casos será feita a comparação com base nas marcas de polaridade.

**Para circuito b1** Para o circuito apresentado em **b1**, tem-se as seguintes resultados para tensão de linha.

$$\begin{cases} V_{ab} = 7621.02 \angle -30^\circ V \\ V_{bc} = 7621.02 \angle -150^\circ V \\ V_{?a} = 7621.02 \angle 90^\circ V \end{cases}$$

Com isso, a tensão no terminal aberto é

$$V_{c?} = V_{ab} + V_{bc} + V_{?a}$$

$$\boxed{V_{c?} = 0 \angle 62.8^\circ V}$$

Como  $V_{c?}$  tem magnitude nula, é possível fechar o circuito tranquilamente.

**Para circuito b2** Para o circuito apresentado em **b2**, tem-se as seguintes resultados para tensão de linha.

$$\begin{cases} V_{ab} = 7621.02 \angle -30^\circ V \\ V_{bc} = 7621.02 \angle 30^\circ V \\ V_{?a} = 7621.02 \angle 90^\circ V \end{cases}$$

Com isso, a tensão no terminal aberto é

$$V_{c?} = V_{ab} + V_{bc} + V_{?a}$$

$$\boxed{V_{c?} = 1.5242 \times 10^4 \angle 30^\circ V}$$

Como  $V_{c?}$  tem magnitude não nula (e, num caso ainda pior, tendo o dobro da tensão de fase), **não é possível fechar o circuito de forma alguma.**

**Para circuito b3** Para o circuito apresentado em **b3**, tem-se as seguintes resultados para tensão de linha.

$$\begin{cases} V_{ab} = 7621.02 \angle -30^\circ V \\ V_{bc} = 7621.02 \angle 30^\circ V \\ V_{?a} = 7621.02 \angle 90^\circ V \end{cases}$$

Com isso, a tensão no terminal aberto é

$$V_{c?} = V_{ab} + V_{bc} + V_{?a}$$

$$\boxed{V_{c?} = 1.5242 \times 10^4 \angle 30^\circ V}$$

Como  $V_{c?}$  tem magnitude não nula (e, num caso ainda pior, tendo o dobro da tensão de fase), **não é possível fechar o circuito de forma alguma.**

## Questão 1.8

Um transformador trifásico abaixador de  $5 \times 10^6$  VA,  $1.32791 \times 10^5 / 2.39 \times 10^4$  V, 60 Hz, ligado em  $Y/\Delta$  foi submetido a um ensaio de curto-circuito realizado pelo lado de baixa tensão ( $2.39 \times 10^4$  V) de onde se obteve a seguinte impedância equivalente, por fase:  $1.14264 + 5.7132i$   $[\Omega]$ . Os seguintes resultados foram obtidos de um ensaio de circuito aberto, realizado pelo lado de baixa tensão, a 60 Hz:  $P_{3\phi} = 4.49 \times 10^4$  W;  $I_l = 8.72$  A;  $V_l = 2.39 \times 10^4$  V. O equipamento está alimentando uma carga trifásica equilibrada de  $1.2 \times 10^7$  W, com um fator de potência 0.8 adiantado. A tensão na carga foi ajustada para  $2.39 \times 10^4$  V.

Para a sua versão, pede-se:

- A tensão na fonte, a corrente e a potência aparente fornecidas pela fonte, referidas ao primário (lado 1), e o fator de potência “visto” pela fonte, usando o modelo impedância série;
- O rendimento e a regulação do transformador, usando o modelo impedância série. Usar a potência do ensaio a vazio, se realizado com tensão nominal;
- Comentar os resultados!

## Resolução

Inicialmente, para facilitar os cálculos, será feita a conversão do formato  $\Delta$  para um formato Y. Assim,

$$Z_{eq} = \frac{1.14264 + 5.7132i}{3} \Rightarrow \boxed{0.3809 + 1.9044i\Omega}$$

Como é pedido o sistema referido ao lado de alta tensão (primário), será inicialmente encontrado sistema para o secundário e então convertido para o primário (uma vez que todos os valores encontrados foram para o secundário). Inicialmente determina-se o parâmetro de conversão  $a = \frac{1.32791 \times 10^5}{(\sqrt{3})(2.39 \times 10^4)} = 4$ .

Define-se a tensão de fase na carga como  $V_s = \frac{V_l}{\sqrt{3}} = 1.379867 \times 10^4$  V. Também é possível determinar o ângulo de defasagem como  $\phi = \arccos 0.8 = 0.6435011^\circ$ . Como  $P_{3\phi} = (\sqrt{3})(V_l)(I_l)(fp)$ , pode-se determinar a corrente de saída (no secundário).

$$I_s = \frac{P_{3\phi}}{(\sqrt{3})(V_l)(fp)} = \frac{1.2 \times 10^7}{(\sqrt{3})(2.39 \times 10^4)(0.8)}$$

Assim,

$$I_s = 289.88 - 217.41iA \quad \text{ou} \quad I_s = 362.35 \angle -36.87^\circ A$$

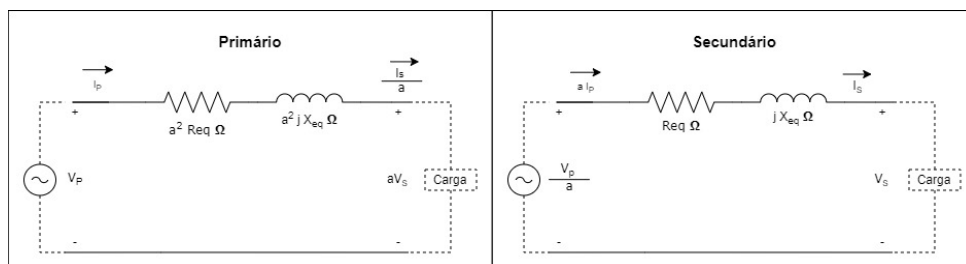


Figura 2: Relações entre Primário e Secundário

## Questão 1.9

### Enunciado

Para a sua versão, no exemplo anterior, ajustando a tensão na entrada do transformador para o seu valor nominal, se o transformador está fornecendo corrente nominal a fator de potência 0,6 capacitivo, pede-se:

- a. A tensão sobre a carga, corrente e a potência aparente fornecidas pela fonte, referidas ao primário (lado 1), e o fator de potência “visto” pela fonte, usando o modelo impedância série;
- b. O rendimento e a regulação do transformador, usando o modelo impedância série. Usar a potência do ensaio a vazio, se realizado com tensão nominal;
- c. Comparar com os resultados do Exemplo 1.8: Transformador trifásico abaixador com tensão especificada na carga. Comentar os resultados!

### Resolução

Working on it :)



## Questão 1.10

### Enunciado

Os dois transformadores abaixo são ligados em paralelo para alimentar uma carga trifásica equilibrada.

**TRANSFORMADOR 1:** Um transformador trifásico abaixador de  $5 \times 10^6$  VA,  $1.32791 \times 10^5 / 2.39 \times 10^4$  V, 60 Hz, ligado em  $Y/\Delta$  foi submetido a um ensaio de curto-circuito realizado pelo lado de baixa tensão ( $2.39 \times 10^4$  V) de onde se obteve a seguinte impedância equivalente, por fase:  $1.14264 + 5.7132i$   $[\Omega]$ . Os seguintes resultados foram obtidos de um ensaio de circuito aberto, realizado pelo lado de baixa tensão, a 60 Hz:  $P_{3\phi} = 4.49 \times 10^4$  W;  $I_l = 8.72$  A;  $V_l = 2.39 \times 10^4$  V.

**TRANSFORMADOR 2:** Um transformador trifásico abaixador de  $6.6 \times 10^5$  VA,  $7621.02 / 440$  V, 60 Hz, ligado em  $Y/\Delta$  foi submetido a um ensaio de curto-circuito realizado pelo lado de baixa tensão (440V) de onde se obteve a seguinte impedância equivalente, por fase:  $0.0142876 + 0.0264176i$   $[\Omega]$ . Os seguintes resultados foram obtidos de um ensaio de circuito aberto, realizado pelo lado de alta tensão, a 60 Hz:  $P_{3\phi} = 5290.3$  W;  $I_l = 1.77$  A;  $V_l = 7621.02$  V.

Se o conjunto está alimentando uma carga nominal (tensão e corrente nominais), sob fator de potência 0.6 capacitivo, pede-se:

- A tensão na fonte, a corrente e a potência aparente fornecidas pela fonte e por cada transformador em paralelo, referidas ao primário (lado 1), e o fator de potência “visto” pela fonte e o fator de potência de cada transformador, usando o modelo impedância série;
- O rendimento e a regulação de cada transformador;
- Comentar os resultados!

### Resolução

Working on it :)

## Questão 1.13

### Enunciado

Um transformador de potência de  $1.1 \times 10^5$  VA, 4400/440 V, 60 Hz, possui os seguintes parâmetros:

$$\begin{cases} r_1 = 2.5[\Omega]; & x_1 = 3.7417[\Omega]; & g_m = 6.1983 \times 10^{-5}[S]; & b_m = 4.503 \times 10^{-4}[S] \\ r_2 = 0.025[\Omega]; & x_2 = 0.037417[\Omega] & \text{(Referidos ao lado 2)} \end{cases}$$

Usando os valores nominais do equipamento como valores de base e **usando a técnica p.u.**, para a sua versão, Pede-se:

- A tensão na fonte e a potência aparente fornecida pela fonte se o transformador estiver alimentando carga nominal (potência aparente e tensão nominais), fator de potência 0,6 capacitivo, usando o modelo impedância série;
- O rendimento e a regulação do transformador;
- Retornar aos valores reais e comparar as grandezas obtidas com aquelas similares para o mesmo fator de potência, obtidas no Exemplo 1.5. Comentar!

### Resolução

Working on it :)

## Questão 1.14

### Enunciado

Um transformador de potência de  $1.1 \times 10^5$  VA, 4400/440 V, 60 Hz, possui os seguintes parâmetros:

$$\begin{cases} r_1 = 2.5[\Omega]; & x_1 = 3.7417[\Omega]; & g_m = 6.1983 \times 10^{-5}[S]; & b_m = 4.503 \times 10^{-4}[S] \\ r_2 = 0.025[\Omega]; & x_2 = 0.037417[\Omega] & \text{(Referidos ao lado 2)} \end{cases}$$

Três transformadores idênticos, dentro de cada da versão, são ligado formando um banco trifásico  $\Delta/Y$ . Usando os valores nominais do banco trifásico como valores de base (valores trifásicos!) e **usando a técnica p.u.**, pede-se:

- A tensão na fonte e a potência aparente fornecida pela fonte se o transformador estiver alimentando carga nominal (potência aparente e tensão nominais), fator de potência 0,6 capacitivo, usando o modelo impedância série;
- O rendimento e a regulação do transformador;
- Retornar aos valores reais e comparar as grandezas de fase obtidas com aquelas similares para o mesmo fator de potência, obtidas no Exemplo 1.13. Comentar!

### Resolução

Working on it :)

## Questão 1.15

### Enunciado

Um transformador de potência monofásico, de  $2.2 \times 10^5 \text{VA}$ , 4400/440 V, 60Hz, deve ser usado como autotransformador para alimentar um circuito de 440V a partir de um gerador de 4840V. Sob carga nominal e fator de potência 0.6 indutivo, o rendimento do transformador monofásico foi calculado como de 96.5%. Para o autotransformador, pede-se:

- O diagrama de suas ligações (incluir as marcas de polaridade!);
- Sua potência aparente nominal, separando em potência transformada, potência passante e potência total;
- Seu rendimento a plena carga, com fatores de potência 0.6 indutivo e 0.8 indutivo. COMENTAR!

### Resolução

Working on it :)

## Questão 1.16

### Enunciado

Um transformador de três enrolamentos foi ensaiado para a obtenção de suas impedâncias de curto-circuito (parâmetros longitudinais). Percebeu-se que as componentes reativas em cada impedância, em módulo, foram maiores que dez vezes as respectivas componentes resistivas. As características nominais de cada enrolamento são:

- Primário:  $2.97 \times 10^4 \text{V}$ ,  $1.5 \times 10^7 \text{VA}$ ;
- Secundário:  $1.32 \times 10^5 \text{V}$ ,  $1.5 \times 10^7 \text{VA}$ ;
- Terciário:  $9600 \text{V}$ ,  $5.25 \times 10^6 \text{VA}$ ;

Após os ensaios em laboratório, os dados foram trabalhados e transformados em valores percentuais, como segue:

- Ensaio 1:  $Z_{ps} = 6.9\%$ , na base  $2.97 \times 10^4 \text{V}$  e  $1.5 \times 10^7 \text{VA}$ ;
- Ensaio 2:  $Z_{ps} = 5.6\%$ , na base  $2.97 \times 10^4 \text{V}$  e  $5.25 \times 10^6 \text{VA}$ ;
- Ensaio 3:  $Z_{ps} = 3.8\%$ , na base  $1.32 \times 10^5 \text{V}$  e  $5.25 \times 10^6 \text{VA}$ ;

Pede-se:

- Desenhar o circuito elétrico equivalente completo em por unidade (pu) com os cálculos e as indicações numéricas de cada parâmetro, usando como base potência nominal do enrolamento primário e as tensões nominais;
- Desenhar o circuito elétrico equivalente completo em Ohms ( $\Omega$ ) com os cálculos e as indicações numéricas de cada parâmetro, referido ao terciário.

### Resolução

Working on it :)