

# Simulação sobre Transformadores - Rendimento e Regulação

Felipe Brandão Cavalcanti 08/29111

11 de julho de 2010

Dados do transformador:

- Transformador monofásico de 50 kVA, 2300/230 V, 60 Hz.
- A resistência do enrolamento de alta tensão vale 0,65 ohms.
- A resistência do enrolamento de baixa tensão vale 0,0065 ohms.
- Ensaio de circuito aberto:  $V = 230$  V,  $I = 5,7$  A,  $P = 190$  W.
- Ensaio de curto-circuito:  $V = 41,5$  V,  $I = 21,7$  A,  $P =$  não usado.

Considere que a tensão no primário é fixa e vale 1,0 pu para todas as situações de carga.

## 1 Questão 1

Com os dados dos ensaios em vazio e em curto-circuito, obter o circuito equivalente do transformador em pu. Utilize a representação usual do transformador (figura 3.5 da apostila).

Os cálculos foram feitos utilizando o seguinte modelo de transformador:

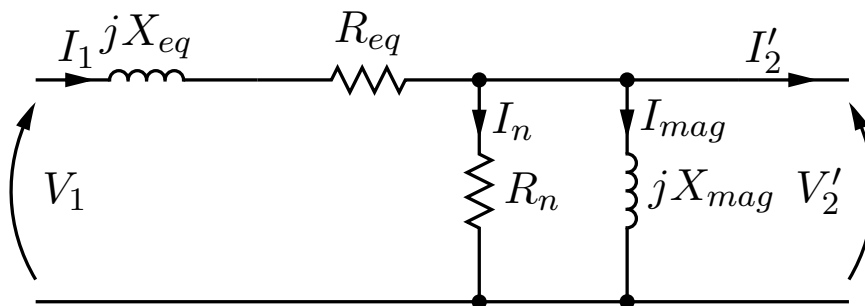


Figura 1: Modelo do Transformador

Primeiramente, calculamos as bases do sistema pu. Adotamos  $B1$  como o primário (alta tensão) e  $B2$  como o secundário (baixa tensão):

$$S_{B1} = S_{B2} = 50 \text{ kVA} \quad (1)$$

$$V_{B1} = 2300 \text{ V} \quad (2)$$

$$V_{B2} = 230 \text{ V} \quad (3)$$

$$I_{B1} = \frac{S_{B1}}{V_{B1}} = \frac{50000}{2300} = 21,739 \text{ A} \quad (4)$$

$$I_{B2} = \frac{S_{B2}}{V_{B2}} = \frac{50000}{230} = 217,39 \text{ A} \quad (5)$$

$$Z_{B1} = \frac{V_{B1}^2}{S_{B1}} = \frac{2300^2}{50000} = 105,8\Omega \quad (6)$$

$$Z_{B2} = \frac{V_{B2}^2}{S_{B2}} = \frac{230^2}{50000} = 1,058\Omega \quad (7)$$

A partir dos dados do ensaio de curto aberto (feitos nos baixa tensão), obtemos o valor da resistência que representa as perdas no ferro:

$$\begin{aligned} (R_n + R_{winding}) &= \frac{V_{oc}^2}{P_{oc}} \\ (R_n + 0,0065) &= \frac{230^2}{190} \\ R_n &= 278,4134\Omega \end{aligned} \quad (8)$$

Convertendo para o sistema p.u.:

$$R_{n_{pu}} = \frac{R_n}{Z_{B2}} = \frac{278,4}{1,058} = 263,15 \text{ p.u.} \quad (9)$$

Também podemos utilizar esse ensaio para calcular a impedância de magnetização, se desprezarmos a queda gerada pela impedância em série no circuito equivalente:

$$\begin{aligned} |Z_{os}| &= \frac{|V_{os}|}{|I_{os}|} = \frac{230}{5,7} = 40,35\Omega \quad (10) \\ Z_{os} &= \left( \frac{1}{R_n} + \frac{1}{X_{mag}} \right)^{-1} \\ \frac{1}{|Z_{os}|^2} &= \left( \frac{1}{|R_n|} \right)^2 + \left( \frac{1}{|X_{mag}|} \right)^2 \\ \left( \frac{1}{|Z_{os}|} \right)^2 - \left( \frac{1}{|R_n|} \right)^2 &= \left( \frac{1}{|X_{mag}|} \right)^2 \\ \sqrt{\left( \frac{1}{|Z_{os}|} \right)^2 - \left( \frac{1}{|R_n|} \right)^2} &= \left( \frac{1}{|X_{mag}|} \right) \\ \sqrt{\left( \frac{1}{40,35} \right)^2 - \left( \frac{1}{278,4} \right)^2} &= \left( \frac{1}{|X_{mag}|} \right) \\ \left( \frac{1}{|X_{mag}|} \right) &= 0,024521 \\ |X_{mag}| &= 40,7814\Omega \end{aligned} \quad (11)$$

Convertendo para o sistema p.u.:

$$|X_{mag_{pu}}| = \frac{|X_{mag}|}{Z_{B2}} = \frac{40,7814}{1,058} = 38,545 \text{ p.u.} \quad (12)$$

Utilizamos o ensaio de curto-circuito para calcular a impedância equivalente em série:

$$|Z_{sc}| = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} = \frac{41,5}{21,7} = 1,91244\Omega \quad (13)$$

Sabemos as resistências das bobinas, e que são iguais quando refletidas. Então:

$$|R_e| = 2 \cdot R_{winding} = 2 \cdot 0,65 = 1,3\Omega \quad (14)$$

$$\begin{aligned} |Z_{sc}| &= \sqrt{(2 \cdot R_{wind})^2 + (X_{eq})^2} \\ 1,91244^2 &= 1,69 + (|X_{eq}|)^2 \\ |X_{eq}| &= 1,4026\Omega \end{aligned} \quad (15)$$

Convertendo para o sistema p.u.:

$$|R_{eq_{pu}}| = \frac{|R_{eq}|}{Z_{B1}} = \frac{1,3}{105,8} = 0,0122873 \text{ p.u.} \quad (16)$$

$$|X_{eq_{pu}}| = \frac{|X_{eq}|}{Z_{B1}} = \frac{1,4026}{105,8} = 0,013257 \text{ p.u.} \quad (17)$$

## 2 Questão 2

Traçar a curva do rendimento do transformador, com carga variando de 0% a 100% do valor nominal, em passos de 10%, para três situações diferentes:

- Situação A: Carga com fator de potência 0,8 indutivo.
- Situação B: Carga com fator de potência unitário.
- Situação C: Carga com fator de potência 0,8 capacitivo.

Trace as três curvas em um mesmo gráfico (no eixo Y o rendimento do transformador, de 0% a 100%, e no eixo X o percentual de carga, de 0% a 100%). Identifique claramente os eixos e cada uma das curvas.

Primeiramente, devemos escolher um método para simular a carga. Nesse caso, utilizamos o método da impedância constante, ou seja, para cada carga, calculamos a impedância assumindo uma tensão de 1 p.u. sobre ela:

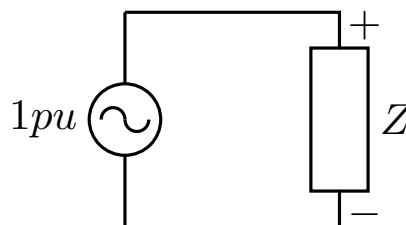


Figura 2: Modelagem da carga

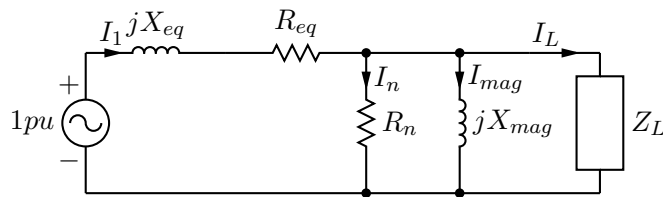


Figura 3: Modelo do transformador e carga

Como sabemos a potência e o fator de potência da carga em para cada ponto da simulação, calculamos a impedância para cada um desses pontos. Após o cálculo, colocamos a carga no circuito equivalente e resolvemos o circuito, como visto na Figura 3.

Com todas as correntes e tensões, calculamos a razão entre a potência real entregue ao transformador e a potência real consumida pela carga:

$$\eta\% = 100 \frac{Pot_{Load}}{Pot_{source}} \quad (18)$$

Utilizando o MATLAB, a seguinte curva foi obtida:

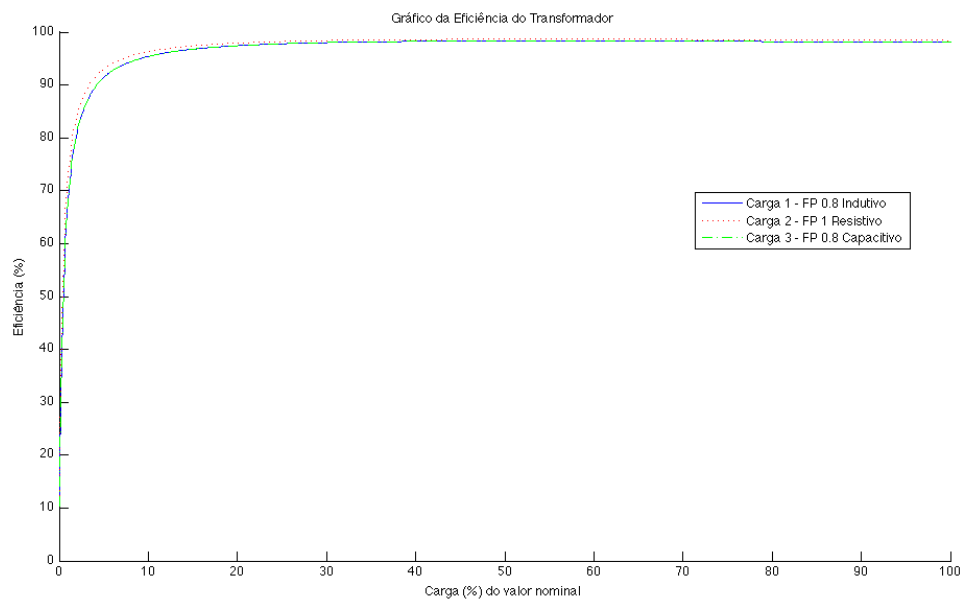


Figura 4: Gráfico da eficiência do transformador

### 3 Questão 3

Traçar a curva de regulação do transformador, com carga variando de 0% a 100% do valor nominal, em passos de 10%, para três situações diferentes:

- Situação A: Carga com fator de potência 0,8 indutivo.
- Situação B: Carga com fator de potência unitário.

- Situação C: Carga com fator de potência 0,8 capacitivo.

Trace as três curvas em um mesmo gráfico (no eixo Y o valor percentual da regulação da tensão, e no eixo X o percentual de carga, de 0 a 100%). Identifique claramente os eixos e cada uma das curvas.

Utilizando o mesmo método apresentado na Questão 2, podemos calcular a regulação de tensão utilizando a equação:

$$RT_{\%} = 100 \frac{V_{in} - V_{load}}{V_{load}} \quad (19)$$

O resultado foi obtido utilizando o MATLAB:

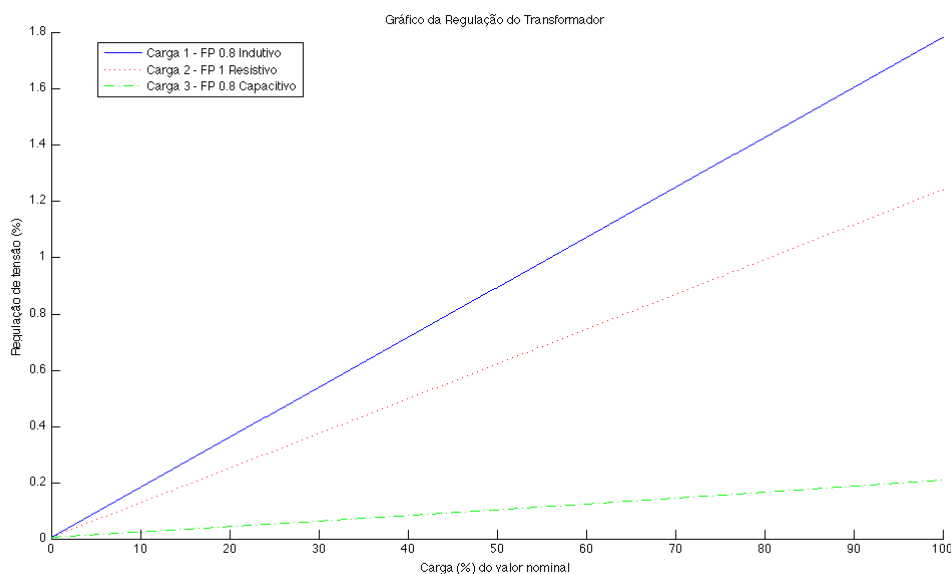


Figura 5: Gráfico da regulação do transformador

## 4 Questão 4

Justifique o comportamento das curvas de rendimento e de regulação, com base na teoria (escreva pelo menos um parágrafo sobre o rendimento e um parágrafo sobre a regulação).

O comportamento demonstrado pela simulação é o comportamento clássico das curvas de regulação de tensão e de eficiência.

A curva de eficiência tem esse comportamento quase-exponencial devido a presença da impedância em paralelo e em série no modelo do transformador. A impedância em paralelo representa a perda no núcleo por histerese e a magnetização - essa perda é relativamente constante, dependente apenas da tensão na carga. O elemento em série representa a perda pela resistência do fio e por dispersão do transformador. A curva tem esse formato pois com cargas pequenas, a impedância em paralelo é significativa quando comparado a impedância da carga - ou seja, a potência consumida pelas elementos parasitas em paralelo é da mesma ordem de grandeza que a

carga, levando a baixos valores de eficiência. Como a corrente é pequena, a impedância em série representa uma perda muito pequena.

Com cargas maiores, a impedância em paralelo pode ser quase desprezada, restando apenas a impedância em série. Isso leva a um rendimento bastante alto, em torno de 95%. Como a perda da impedância em série só é significativa com altíssimos valores de corrente, vemos uma pequena queda na curva com cargas acima de 50%.

A curva de regulação depende somente da corrente do transformador, pois o único parâmetro que determina a diferença entre a tensão da fonte (fixa em 1 p.u.) e a carga é a impedância equivalente em série. Como a variação da carga (para um dado fator de potência) varia apenas a corrente, temos a relação linear vista nos gráficos (Lei de Ohm). A diferença entre as cargas existe pois existe uma variação entre as correntes para cada carga, levando a uma queda de tensão diferente para cada carga. Um detalhe interessante é que essa curva pode ser negativa, caso uma carga muito capacitiva seja utilizada, pois nesse caso a tensão na carga é maior que a tensão na fonte.

## 5 Questão 5

**Você compraria esse transformador? Justifique sua resposta.**

Dependendo da aplicação e do preço, sim. O rendimento e regulação desse transformador estão abaixo dos valores típicos, o que faz com que o preço pese bastante na decisão. Outro fator de peso é a aplicação - se esse transformador for muito pouco utilizado (transformador de um circuito de geradores de emergência, por exemplo), o rendimento apresentado é bastante apropriado. Por último, o único caso onde esse transformador definitivamente não deve ser utilizado é com cargas abaixo de 5% do valor nominal, pois nesse caso é muito mais interessante comprar um transformador de menor capacidade com um rendimento maior nessa faixa de operação.