

Vamos fazer uma análise mais minuciosa do transformador de 100kVA, 60Hz, 13200:220 V (exercício resolvido em sala de aula), ver <http://disciplinas.stoa.usp.br/mod/resource/view.php?id=544035>.

A alimentação sempre foi feita pelo lado de alta tensão em condições distintas, conforme pode-se ver abaixo.

**Caso 1-** A carga no secundário (neste caso, baixa tensão) absorvia uma potência aparente, sob tensão nominal com fator de potência variável. Fez-se quatro ensaios com cargas distintas que absorviam a mesma potência aparente e em cada gráfico variou-se somente a fase da carga. Os cálculos foram feitos com o circuito a fluxo constante.

Observe que a regulação pode ser positiva ou negativa, conforme a natureza da carga e, na medida que a carga absorve potência aparente maior a regulação aumenta, mantido um fator de potência.

Observe ainda como a fase da carga influencia a regulação do transformador. Note ainda que para uma carga com um determinado fator de potência, ou seja, com um certo ângulo de fase, aumentos de regulação podem ser percebidos com incrementos na potência aparente absorvida pela carga.

Note que existe um único ponto em que a regulação seria nula e que, por coincidência, no gráfico de potência absorvida pela carga igual a 80kVA este ponto fica bastante explícito. Observe que para que a regulação seja nula, a carga deve ser capacitiva. Tente explicar através de diagramas de fasores o comportamento da regulação em função do ângulo de fase da carga. Perceba que a forma que a carga é definida faz com que a corrente na carga seja, para cada gráfico, constante de valor  $I = P_{ap}/V_{nom}$

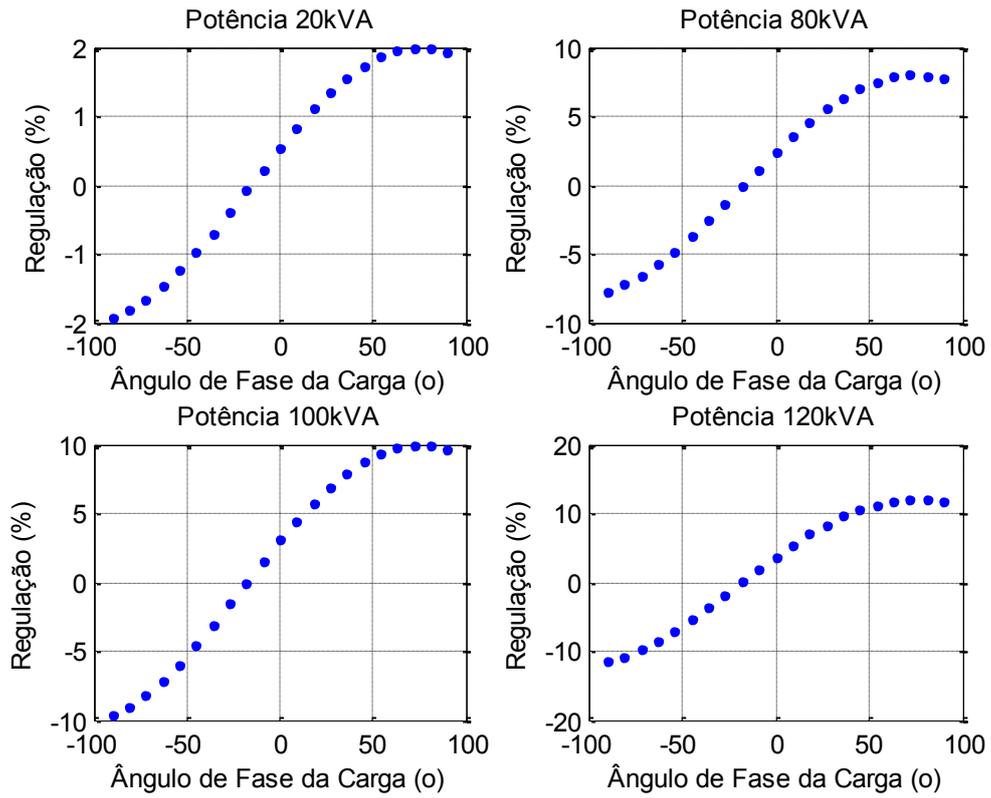


Figura 1 Influência sobre a Regulação

Já o efeito sobre o rendimento pode ser visto na Figura 2.

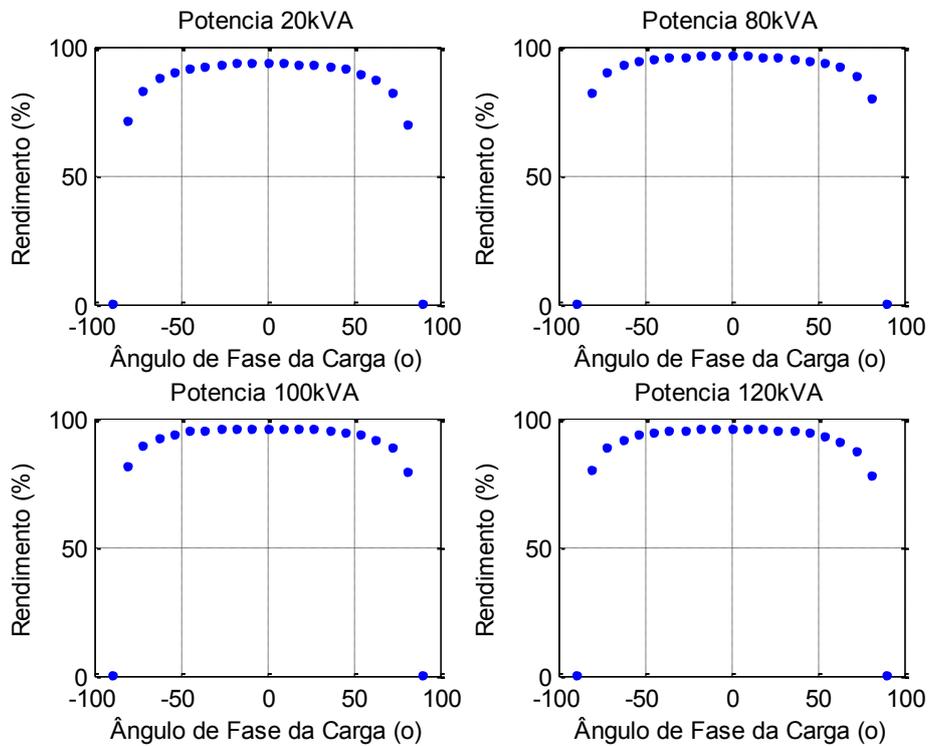


Figura 2 Influência do Tipo da Carga no Rendimento

Pode-se observar que, fixado um valor de fator de potência, o rendimento é máximo quando a carga tem fator de potência unitário e que em uma faixa razoavelmente larga de variação do ângulo de fase da carga, o rendimento é quase constante, o que é uma qualidade positiva para o transformador.

**Caso 2-** Uma outra forma de definir a carga conectada ao secundário de um transformador é através do valor da impedância conectada. Neste caso, adotou-se as seguintes premissas: a tensão no primário sempre é senoidal de valor eficaz igual ao nominal (13200 V). A regulação foi analisada com o circuito equivalente a fluxo constante, mas o rendimento foi analisado com o circuito equivalente completo. Na figura 3, pode-se verificar a variação da regulação com relação ao módulo da impedância que foi inserida no secundário.

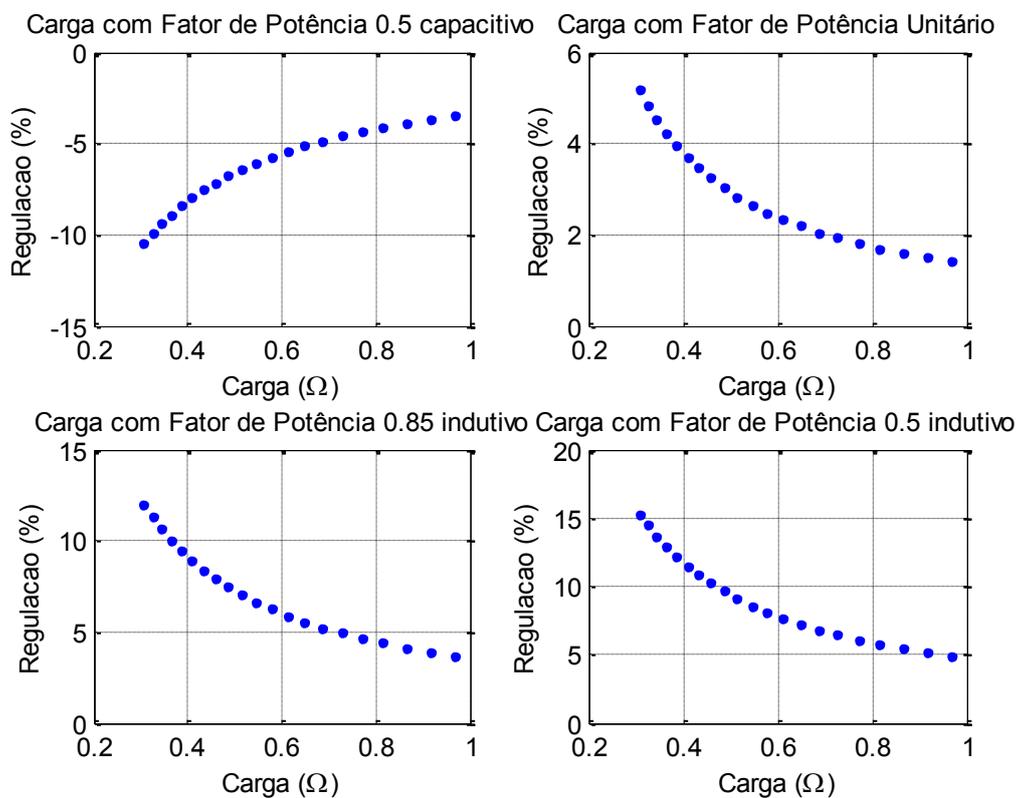


Figura 3 Regulação em função da Impedância da Carga (fatores de potência distintos)

É possível observar que cargas de natureza resistiva ou indutiva têm regulação positiva, ao passo que as cargas de natureza capacitiva simulada têm sempre regulação negativa. Tente explicar este fenômeno através de um diagrama de fasores.

A análise do rendimento é bastante interessante. Pode-se verificar que há um ponto em que o rendimento é máximo. O valor do rendimento para cada fator de potência é distinto, sendo que ele é máximo quando o fator de potência da carga é unitário, observe a Figura 4.

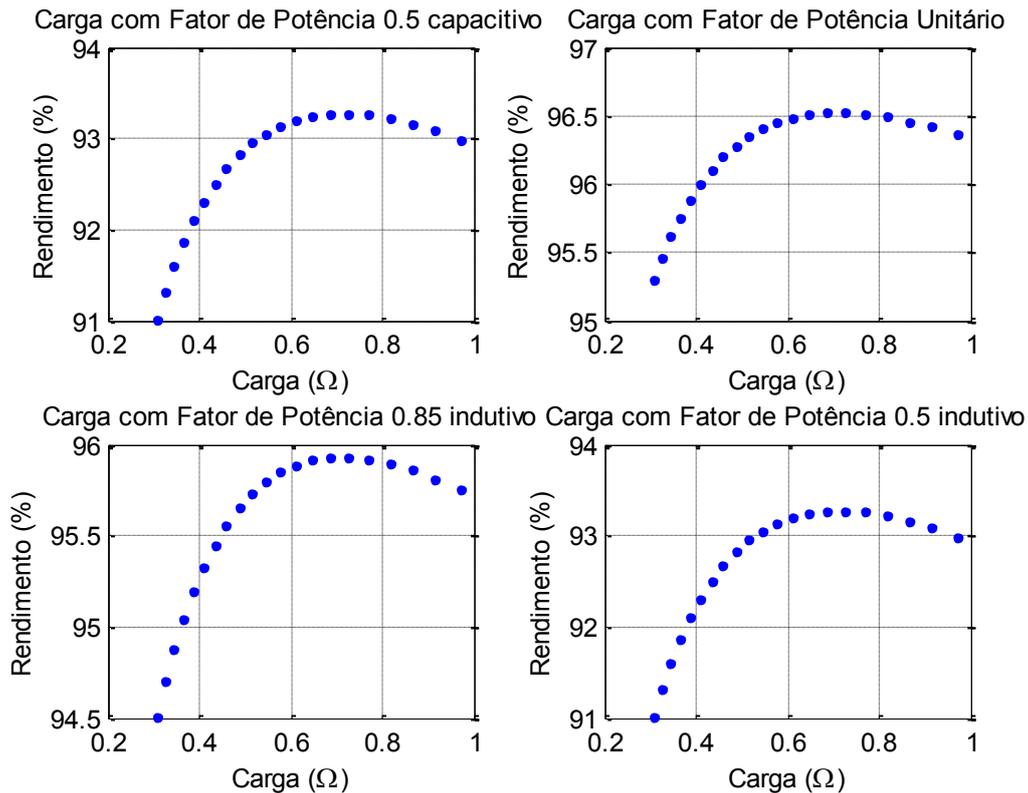


Figura 4 Rendimento em função da Impedância da Carga (fatores de potência distintos)

A carga de fator de potência unitário é aquela que propicia ao transformador o maior rendimento. Isto faz com que seja importante analisar os valores de perda joule nos enrolamentos, da perda no ferro e da tensão no secundário. Veja a Figura 5. Note que o rendimento máximo ocorre quando se conecta ao secundário uma carga da ordem de  $0,7\Omega$ . Nesta condição, tanto as perdas no ferro como as perdas joule valem por volta de 1200 W. Este resultado particular pode ser demonstrado para uma carga  $Z$  de fator de potência ( $\cos\varphi$ ) conhecido.

Por simplicidade, pode-se admitir que a carga absorve corrente de módulo  $I = V_2'/Z$  com fator de potência fixo, que a tensão de alimentação vale  $V_1$  e que o transformador pode ser analisado com o modelo a fluxo constante. Assim:

$$\text{Perdas no Ferro} = P_f = \frac{V_1^2}{R_p}$$

$$\text{Perdas Joule} = P_j = R_{cc}I^2$$

$$\text{e o rendimento valerá: } \eta = \frac{V_2'I\cos(\phi)}{V_2'I\cos(\phi) + \frac{V_1^2}{R_p} + R_{cc}I^2}$$

e apenas para encontrar o ponto de máximo rendimento, é conveniente minimizar

$$\frac{1}{\eta} = \frac{V_2' I \cos(\phi) + \frac{V_1'^2}{R_p} + R_{cc} I^2}{V_2' I \cos(\phi)} = 1 + \frac{Z V_1'^2}{(V_2')^2 R_p \cos(\phi)} + \frac{R_{cc}}{Z \cos(\phi)}$$

Ao se buscar o valor nulo de derivada (em relação a Z) desta expressão, obtém-se:

$$\frac{V_1'^2}{(V_2')^2 R_p \cos(\phi)} - \frac{R_{cc}}{Z_{max}^2 \cos(\phi)} = 0$$

Como a carga foi suposta com fator de potência constante, então

$$\frac{V_1'^2}{R_p} = \frac{(V_2')^2}{Z_{max}^2} R_{cc} = R_{cc} I^2.$$

Logo existe uma carga  $Z_{max}$ , de fator de potência ( $\cos(\phi)$ ) que impõe corrente  $I = \frac{V_2'}{Z_{max}}$ , de tal forma que as perdas no ferro ( $\frac{V_1'^2}{R_p}$ ) se igualam às perdas no cobre ( $R_{cc} I^2$ ), confirmando a observação das Figuras 4 e 5.

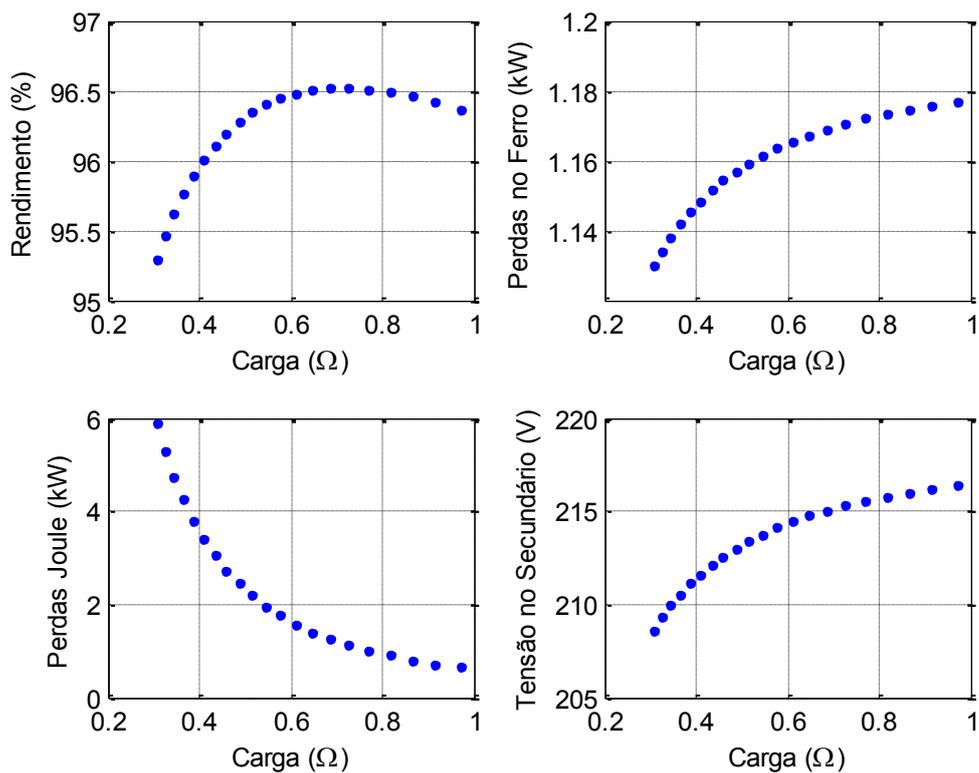


Figura 5 O transformador quando alimenta carga de impedância com fator de potência unitário