

# Simulação 2 – Transformadores

Leonardo Marques Nunes de Mattos – 06/89041

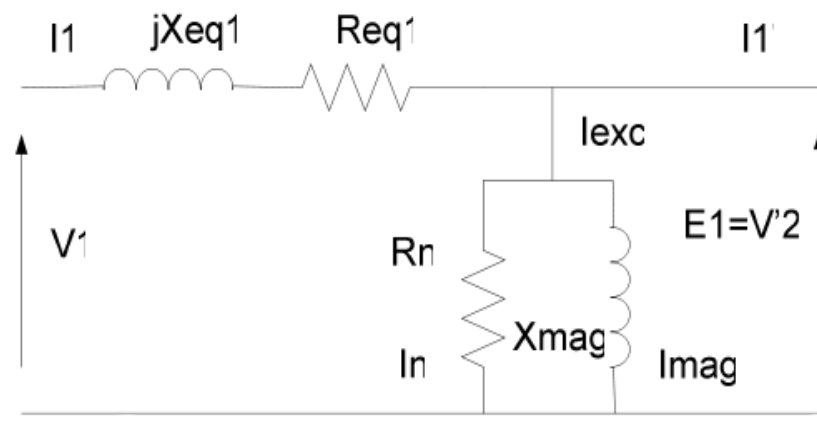
leonardo@mail.analyx.org

## Considerações iniciais:

- Transformador monofásico de 60 kVA, 2300/230 V, 60 Hz.
- A resistência do enrolamento de alta tensão vale 0,60 ohms.
- A resistência do enrolamento de baixa tensão vale 0,0060 ohms.
- Ensaio de circuito aberto:  $V = 230 \text{ V}$ ,  $I = 5,7 \text{ A}$ ,  $P = 190 \text{ W}$ .
- Ensaio de curto-circuito:  $V = 41,5 \text{ V}$ ,  $I = 26,1 \text{ A}$ ,  $P = \text{não usado}$ .
- A tensão no primário é fixa e vale 1,0 pu para todas as situações de carga.
- Modele a carga como uma impedância constante para cada percentual de carga, isto é, calcule a impedância que, ao aplicar tensão nominal, consome a potência desejada.

## Questão 1

Com os dados dos ensaios em vazio e em curto-circuito apresentados abaixo, obter o circuito equivalente do transformador em pu. Utilize a representação usual do transformador (figura 3.5 da apostila) [2,5 pontos].



$$\begin{aligned} V1 &= 1 \text{ p.u.} \\ jXeq1 &= 0.011845634477660 \text{ p.u.} \\ Req1 &= 0.013610586011342 \text{ p.u.} \\ Rn &= 3.157894736842105e+02 \text{ p.u.} \\ Xmag &= 46.254937446082131 \text{ p.u.} \end{aligned}$$

Equação para tensão em  $V'2$ , a partir das leis dos nós e modelagem da carga. Sendo que a carga senha de 0 a 100%, com um fator de potência que retorne theta.

$$V'2 = (V1 - I1)/(Req1 + jXeq1) + V1 / (1 / ((1/rnpu) + (1/xnpu))) - (\cos(\theta) * \text{carga}/100 + j\sin(\theta) * \text{carga}/100) \quad (\text{Eq. 1})$$

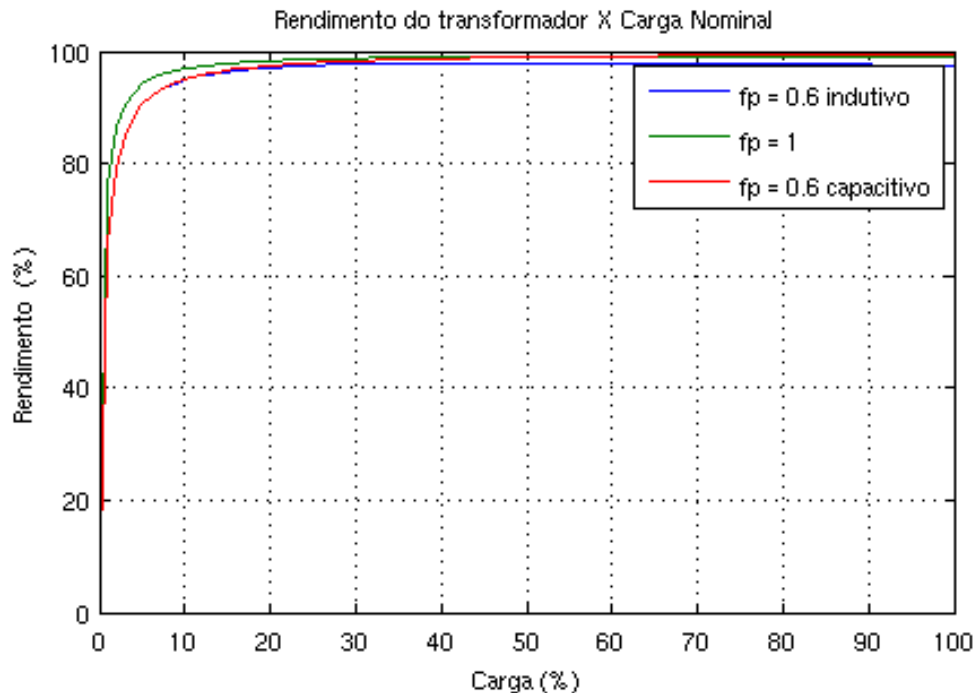
A parte sublinhada, corresponde a modelada na carga.

## 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 0,6 indutivo.
- Situação B: Carga com fator de potência unitário.
- Situação C: Carga com fator de potência 0,6 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 [2,5 pontos].



Modelagem das perdas:

$$\text{perdas} = v1^2/Rn + \text{abs}(((V1-1)/(Req1+jXeq1)))^2*Req1$$

Sendo o primeiro termo relativo as perdas no núcleo e o segundo relativo as perdas no enrolamento.

Modelagem da potência de saída:

$$\text{pout} = \text{fp} * \text{carga}$$

O rendimento obtido segue o que se espera realmente de um transformador, haja visto que para uma pequena carga, as perdas são de grandezas semelhantes com as tensões de saída, principalmente pela perda no núcleo,  $v1^2/Rn$ , a medida que a carga aumenta, a potência de saída aumenta e a eficiência aumenta.

$$\text{Eficiência} = \text{pout} / \text{pout} + \text{perdas}$$

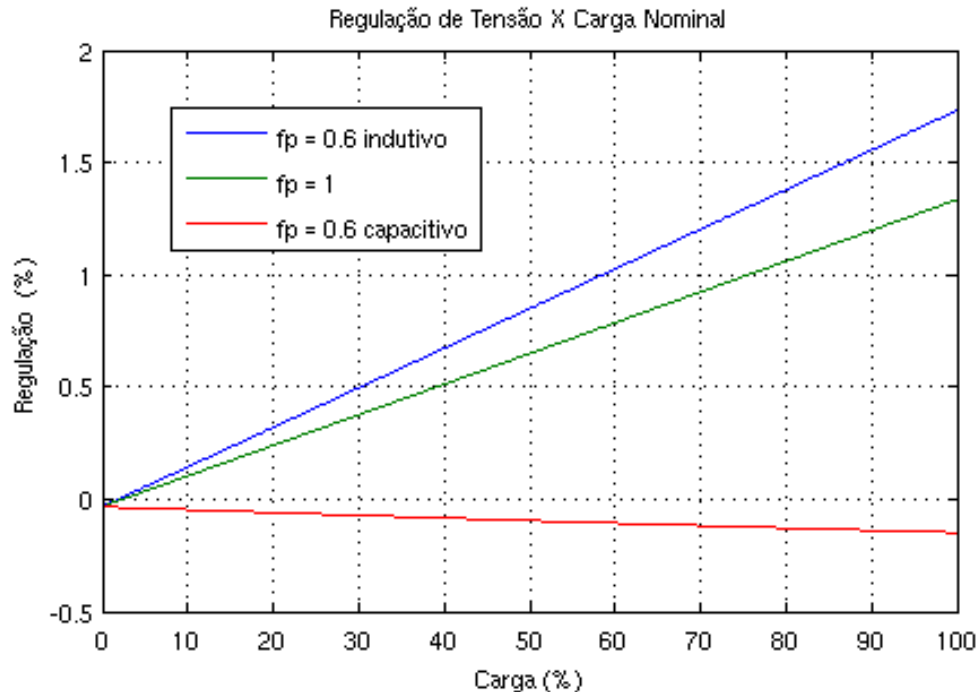
E também, como esperado, o rendimento de uma carga capacitiva é a melhor de todas, haja visto que esse elemento funciona como uma “bateria” elevando a tensão do lado secundário, aumentando a potência nesse nó por conseguinte a eficiência.

### 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 0,6 indutivo.
- Situação B: Carga com fator de potência unitário.
- Situação C: Carga com fator de potência 0,6 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 [2,5 pontos].



Equação usada para modelagem da regulação:

$$\text{Regulação} = 100 \cdot (V_1 - V_2) / V_2 \%$$

As curvas se comportaram conforme o esperado, a curva para fp capacitivo sendo tendo inclinação negativa, haja visto que a tensão em  $V_2$  é maior que em  $V_1$ , dado a característica do capacitor como elemento de energia.

Para fp unitário, a curva foi menor que no fp indutivo, haja visto que para fp unitário, a corrente necessária para servir a mesma potência ativa que em fp indutivo, levando a uma menor perda nos enrolamentos do transformador e por conseguinte levando a uma menor regulação.

E o indutivo, possui maior regulação que o fp unitário, haja visto que para um fp menor que 1, exige uma maior corrente para servir a mesma potência ativa, levando a maiores perdas nos condutores.

### 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) [2,5 pontos].

Foi escrito juntamente com as questões relacionadas a cada assunto.

### Questão 5

Você compraria esse transformador? Justifique sua resposta (não vale ponto). Utilize como referência os valores apresentados no Quadro 1.

## Apêndice

### 1 - Tabela de referência:

Quadro 1 – *Dados característicos de transformadores trifásicos em óleo para instalação interior ou exterior – classe 15 kV – 60 Hz.*

Potência (kVA)	Tensão (V)	Perdas (W)		Rendimento (%)	Regulação (%)	Impedância (%)
		A Vazio	Cobre			
30	220 a 440	200	570	96,85	3,29	3,5
45	220 a 440	260	750	97,09	3,19	3,5
75	220 a 440	390	1.200	97,32	3,15	3,5
112,5	220 a 440	520	1.650	97,51	3,09	3,5

150	220 a 440	640	2.050	97,68	3,02	3,5
225	380 ou 440	900	2.800	97,96	3,63	4,5

Fonte: MAMEDE FILHO, João. *Instalações Elétricas Industriais*. 7ª edição. Editora LTC, RJ,

## 2 – Código do programa:

### %simulacao 2 de conversao

```
format('long'); %melhorar apresentacao dos numeros
```

```
%questão 1
```

```
%transformador
```

```
potencia = 60e3;
```

```
valta = 2300;
```

```
vbaixa = 230;
```

```
req1alta = 0.60;
```

```
req2baixa = 6e-3;
```

```
a = 2300/230;
```

```
%dados ensaios
```

```
%circuito aberto
```

```
vca = 230;
```

```
ica = 5.7;
```

```
pca = 190;
```

```
%curto circuito
```

```
vcc = 41.5;
```

```
icc = potencia/valta;
```

```
%dados em pu
```

```
%ensaio ca, lado de baixa tensao, secundário
```

```
sbase2 = 60e3;
```

```
vbase2 = vbaixa;
```

```
ibase2 = sbase2/vbase2
```

```
vcapu = vca/vbase2
```

```
icapu = ica/ibase2
```

```
pcapu = pca/sbase2
```

```
zbase2 = vbase2/ibase2
```

```
%ensaio cc, lado de alta tensao, primário
```

```
sbase1 = potencia;
```

```
vbase1 = valta;
```

```
ibase1 = sbase1/vbase1
```

```
iccpu = icc/ibase1
```

```
vccpu = vcc/vbase1
```

```
zbase1 = vbase1/ibase1
```

```
%cálculos das impedancias
```

```
%% core losses. medido a partir do ensaio de ca
```

```
rnpu = (vcapu^2)/pcapu
```

```
xnpu = vcapu/(sqrt(icapu^2-(vcapu/rnpu)^2))
```

```
%% copper losses, medido a partir do ensaio de cc
```

```

sbase1 = potencia;
req1pu = req1alta*2/zbase1
req2pu = req2baixa/zbase2
zeq1pu = vccpu/iccpu
xeq1pu = sqrt(zeq1pu^2-req1pu^2)

%questão 2
%%situacao a) fp = 0.6 indutivo
fp1 = 0.6;
fp2 = 1;
fp3 = 0.6;
theta1 = -acos(0.6);
theta2 = acos(1.0);
theta3 = acos(0.6);
controle = 0;
n1 = zeros(1,1);
n2 = zeros(1,1);
n3 = zeros(1,1);
zeqcomplexpu = complex(req1pu,xeq1pu);
for carga=0:1:100
    controle = controle+1;

    %curva 1
    syms v11;
    v11t = solve((v11-1)/zeqcomplexpu+v11/(1/((1/rnpu)+(1/xnpu))))-
complex(cos(theta1)*carga/100,sin(theta1)*carga/100),v11);
    v11n = abs(eval(v11t));
    perdas = v11n^2/rnpu + abs(((v11n-1)/zeqcomplexpu))^2*xeq1pu;
    pout1 = fp1*carga/100;
    n1(controle) = pout1/(pout1+perdas);

    %curva 2
    syms v12;
    v12t = solve((v12-1)/zeqcomplexpu+v12/(1/((1/rnpu)+(1/xnpu))))-
complex(cos(theta2)*carga/100,sin(theta2)*carga/100),v12);
    v12n = abs(eval(v12t));
    perdas = v12n^2/rnpu + abs(((v12n-1)/zeqcomplexpu))^2*xeq1pu;
    pout2 = fp2*carga/100;
    n2(controle) = pout2/(pout2+perdas);

    %curva 3
    syms v13;
    v13t = solve((v13-1)/zeqcomplexpu+v13/(1/((1/rnpu)+(1/xnpu))))-
complex(cos(theta3)*carga/100,sin(theta3)*carga/100),v13);
    v13n = abs(eval(v13t));
    perdas = v13n^2/rnpu + abs(((v13n-1)/zeqcomplexpu))^2*xeq1pu;
    pout3 = fp3*carga/100;
    n3(controle) = pout3/(pout3+perdas);

end

figure(4)
x = 0:1:100;
plot(x,n1*100,x,n2*100,x,n3*100)
grid;
title('Rendimento do transformador X Carga Nominal');

```

```

xlabel('Carga (%)');
ylabel('Rendimento (%)');
legend('fp = 0.6 indutivo', 'fp = 1', 'fp = 0.6 capacitivo');

%questão 3
fp = 0.6;
theta1 = -acos(0.6);
theta2 = acos(1.0);
theta3 = acos(0.6);
controle = 0;
zeqcomplexpu = complex(reqlpu,xeqlpu);
regulacao1 = zeros(1,1);
regulacao2 = zeros(1,1);
regulacao3 = zeros(1,1);
for carga=0:0.1:100
    controle = controle+1;

    %curva 1
    syms v11;
    v11t = solve((v11-1)/zeqcomplexpu+v11/(1/((1/rnpu)+(1/xnpu)))-
complex(cos(theta1)*carga/100,sin(theta1)*carga/100),v11);
    regulacao1(controle) = abs(eval(v11t))-1;

    %curva 2
    syms v12;
    v12t = solve((v12-1)/zeqcomplexpu+v12/(1/((1/rnpu)+(1/xnpu)))-
complex(cos(theta2)*carga/100,sin(theta2)*carga/100),v12);
    regulacao2(controle) = abs(eval(v12t))-1;

    %curva 3
    syms v13;
    v13t = solve((v13-1)/zeqcomplexpu+v13/(1/((1/rnpu)+(1/xnpu)))-
complex(cos(theta3)*carga/100,sin(theta3)*carga/100),v13);
    regulacao3(controle) = abs(eval(v13t))-1;
end

figure(3)
length(regulacao1)
x = 0:0.1:100;
plot(x,regulacao1*100,x,regulacao2*100,x,regulacao3*100);
grid;
title('Regulação de Tensão X Carga Nominal');
xlabel('Carga (%)');
ylabel('Regulação (%)');
legend('fp = 0.6 indutivo', 'fp = 1', 'fp = 0.6 capacitivo');

```