

# Simulação 2 – Transformadores

Leonardo Marques Nunes de Mattos – 06/89041

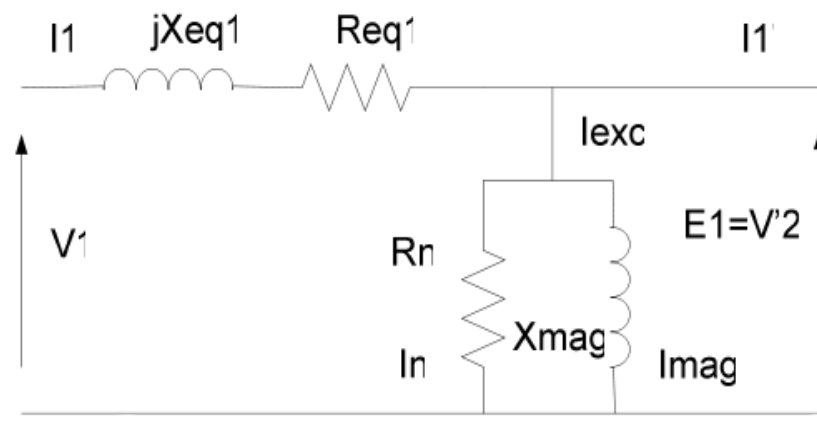
leonardo@mail.analyx.org

## 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.

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

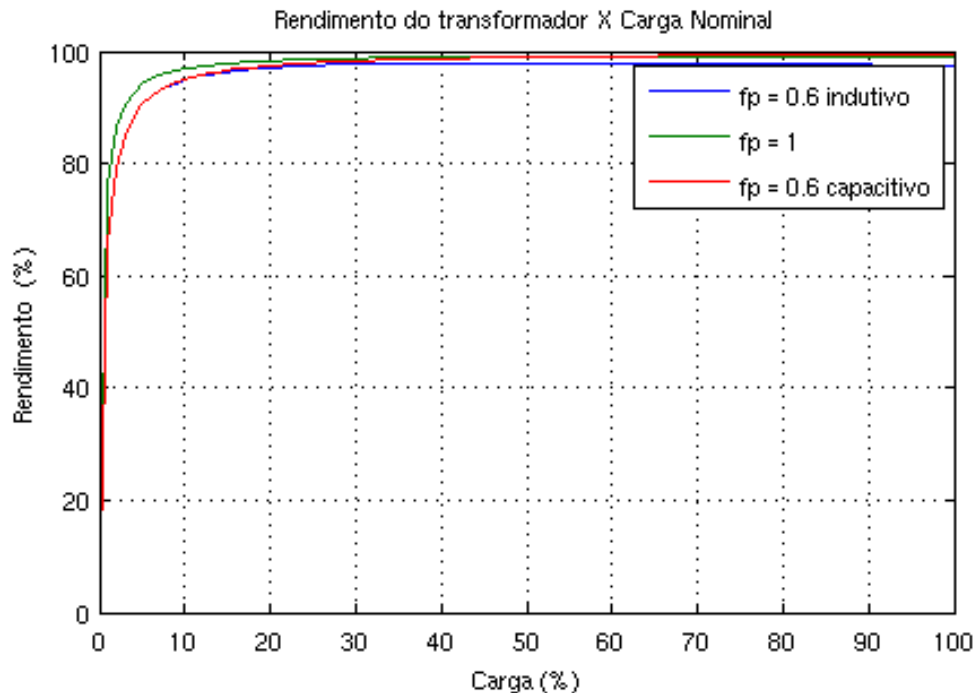
A parte sublinhada, corresponde a modelada na carga.

## 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:

$$\text{perdas} = v_1^2/R_n + \text{abs}(((V_1-1)/(R_{eq1}+jX_{eq1})))^2 \cdot R_{eq1}$$

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

Modelagem da potência de saída:

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

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,  $v_1^2/R_n$ , a medida que a carga aumenta, a potência de saída aumenta e a eficiência aumenta.

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

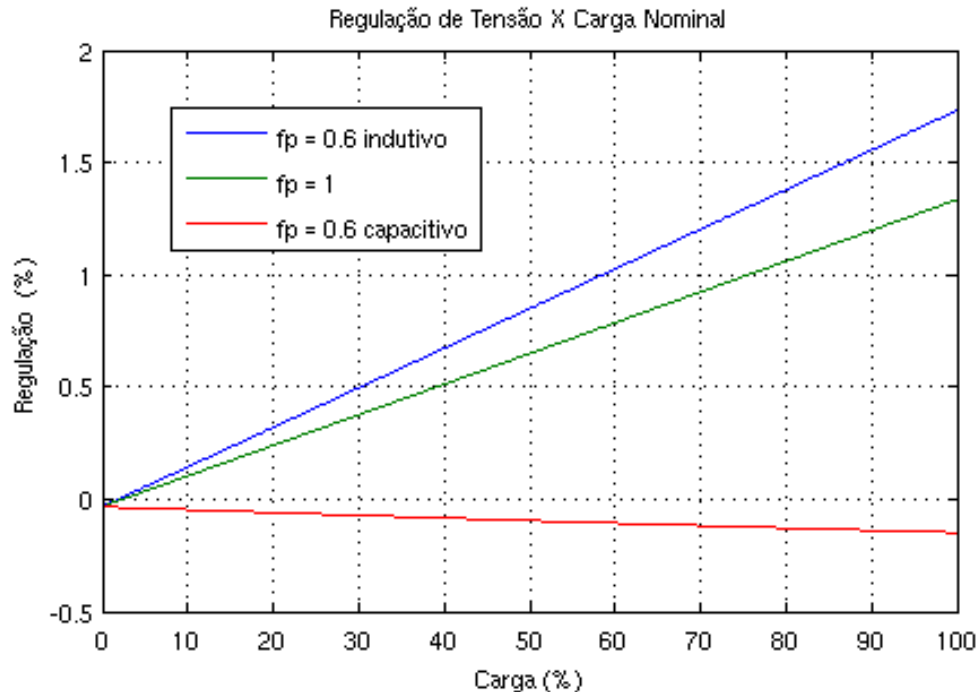
E também, como esperado, o rendimento de uma carga capacitiva é a melhor de todas, haja visto que esse elemento funciona como uma “bateria” elevando a tensão do lado secundário, aumentando a potência nesse nó por conseguinte a eficiência.

### 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<sub>2</sub> é maior que em V<sub>1</sub>, 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.

## 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<br>(kVA) | Tensão<br>(V) | Perdas (W) |       | Rendimento<br>(%) | Regulação<br>(%) | Impedância<br>(%) |
|-------------------|---------------|------------|-------|-------------------|------------------|-------------------|
|                   |               | 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,xeq1pu);
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');

```