

PEA 3306 - Conversão Eletromecânica de Energia

Exercício Computacional 1

Alunos:

Bruno Del Bianco Soares - 10258991

Denisson José Panta Oliveira - 10355440

João Pedro Andrade Machado - 10337105

Turma 01

Prof. Salles

Enunciado

Um transformador monofásico abaixador de núcleo ferromagnético (suposto linear) possui os seguintes valores nominais: 400 kVA, 5.000/320 V, 50 Hz. São conhecidos seus parâmetros de curto circuito, como segue.

- Enrolamento Primário – $R_1 = 0,5$ ohms, $L_1 = 2,14$ mH (AT)
- Enrolamento Secundário – $R_2 = 0,001$ ohms, $L_2 = 4,3$ uH (BT)

Com o lado da alta tensão em vazio, esse transformador absorve corrente de 60 A e potência 2500 W sob tensão nominal no lado da baixa tensão.

1. Cálculo dos parâmetros do transformador real

1.1. Cálculo do lado de AT

A fim de facilitar a programação deste Exercício Computacional, declaramos as variáveis primeiro.

Logo depois percebe-se que no circuito equivalente, os parâmetros da Alta Tensão são os mesmos fornecidos pelo enunciado (referentes ao enrolamento 1). Isso ocorre pois esses parâmetros não têm necessidade de serem refletidos. Portanto:

- $R_1 = 0.5$ [Ohm] (Resistência de Dispersão do enrolamento 1)
- $L_1 = 2.14$ [mH] (Indutância de Dispersão do enrolamento 1)

In [1]:

```

import math
import matplotlib.pyplot as plt
%matplotlib inline
import numpy as np
import pandas as pd
# Declaração das variáveis
# Algoritmo do nUSP = 4
# Carga do transformador é capacitiva

a = 5000/320 # Relação de transformação
f = 50 #Hz
PNominal = 400*10**3 #VA

# Enrolamento Primário
R1 = 0.5 #ohms
Ld1 = 2.14*10**-3 #H (AT)
Xd1 = 2*f*math.pi*Ld1
R1linha = 0.5/(a**2)
Xd1linha = Xd1/(a**2)

print("Os parâmetros do circuito equivalente para alta tensão são Resistência R1: {}[ohms],

```

Os parâmetros do circuito equivalente para alta tensão são Resistência R1: 0.5[ohms], Reatância Xd1: 0.672j[ohms].

1.2. Cálculo do lado de BT

Os dados fornecidos no enunciado são referentes aos parâmetros de curto-circuito. Assim, para a Baixa Tensão vale:

- $R_2 = 0.001$ [Ohm] (resistência do enrolamento 2)
- $L_2 = 4.3E-6$ [H] (indutância de dispersão 2)
- Frequência nominal: 50 [Hz]

A partir desses dados, podemos determinar $L_{d2\text{linha}}$ e $R_{2\text{linha}}$, ou seja, a Indutância de Dispersão 2 e a Resistência do Enrolamento 2 ambas refletidas no lado de Alta Tensão do transformador. Essas grandezas são refletidas pelo fator $a = V_2/V_1$.

In [2]:

```
# Enrolamento Secundário
R2 = 0.001 #ohms
Ld2 = 4.3*10**-6 #H (BT)
# Cálculo dos parâmetros do circuito em vazio(aberto)
# Alimentação no lado de BT com valor nominal, assim temos:
V = 320 #V
P = 2500 #W
I = 60 #A

Xd2 = 50*2*math.pi*Ld2
print("{:.3f}".format(Xd2))
R2linha = a**2* R2
Ld2linha = a**2* Ld2
Xd2linha = 50*2*math.pi*Ld2linha

print("Os parâmetros do circuito equivalente para baixa tensão são R2linha: {:.3f}, Xd2linh
```

0.001

Os parâmetros do circuito equivalente para baixa tensão são R2linha: 0.244,
Xd2linha: 0.330

1.3. Parâmetros comuns de perdas

Dados do enunciado para o Ensaio em Vazio (condição em que o lado da Alta Tensão é aberto):

- $P_o = 2500$ [W]
- $I_o = 60$ [A]
- $V_o = 320$ [V] (tensão do lado BT)

Com estes dados, podemos determinar a Reatância de Magnetização X_m e a Resistência de Perda R_p do transformador, conforme faremos abaixo.

In [3]:

```
Zfi = V/I #ohms
Rp = V**2/ P
Xm = 1/math.sqrt((1/Zfi)**2-(1/Rp)**2)
# Refletindo esses valores para o lado de baixa tensão, temos:
Xmlinha = a**2*Xm
Rplinha = a**2*Rp

print("A Resistência de Perda Rplinha calculada é: {} [Ohm] e A Reatância de Magnetização X
```

A Resistência de Perda Rplinha calculada é: 10000.0 [Ohm] e A Reatância de M
agnetização Xmlinha calculada é: 1313.264j [Ohm]

1.4. Tabela com parâmetros dos lados de alta tensão e baixa tensão

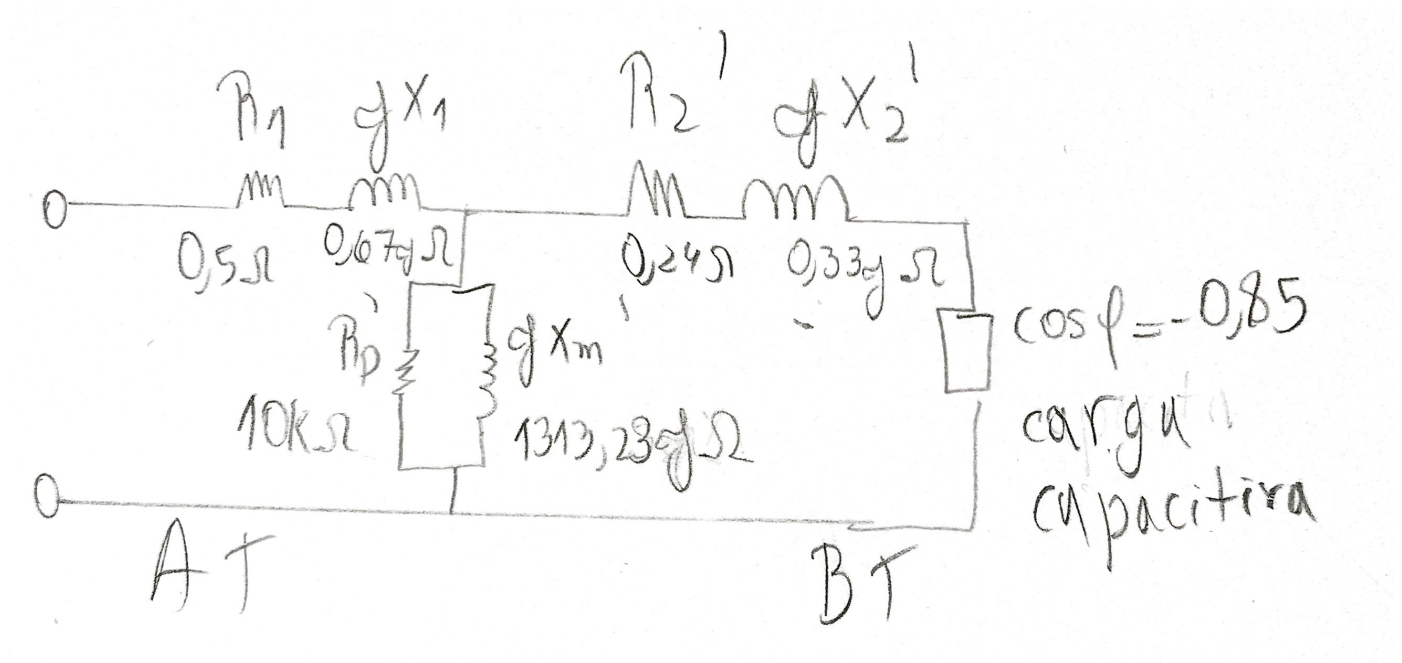
In [4]:

```
data = pd.read_csv('tabela_de_parametros_do_circ_eq.csv', sep=';', index_col = False)
data.set_index('Elemento do circuito', inplace=True)
data.head(10)
```

Out[4]:

	Valor em Ohms
Elemento do circuito	
Rplinha	10000.000
Xmlinha	1.313
R1	0.500
Xd1	0.672
R1linha	0.002
Xd1linha	0.003
R2	0.001
Xd2	0.001
R2linha	0.244
Xd2linha	0.330

1.5. Desenho do circuito equivalente para o Transformador Real referido ao lado de alta tensão



1.6. Gráficos

Método de cálculo do Rendimento

Para o cálculo do rendimento do transformador temos a seguinte fórmula apresentada em sala de aula:

$$\text{Rendimento} = \frac{P_{\text{util}}}{P_{\text{util}} + P_{\text{Fe}} + P_{\text{Cu}}}$$

Tal que:

P_{util} = Potência de saída do Transformador.

P_{Fe} = Perdas por conta do Ferro (correntes de Foucault e histerese).

P_{Cu} = Perdas ôhmicas

No ponto de plena carga, temos que o rendimento é de 0.9885.

In [5]:

```

#Gráfico do Rendimento
P_util = 400000 #VA
P_min = int(0.3 * P_util)
P_max = int(1.5 * P_util)

P_percentual_nominal = []
Rend = []
cosfi = 0.85 #modulo cosfi da carga
V2 = 320
Ip = V2/Rp #V2/Rp
plena_carga = 0

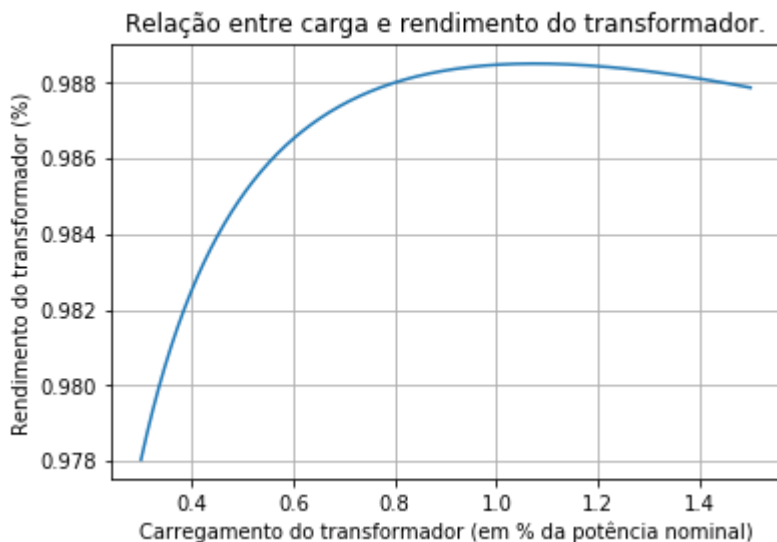
for P_variando in range (P_min, P_max):
    P_percentual_nominal.append(P_variando/P_util)
    I2linha = P_variando/(V2*a*cosfi)
    P_Fe = Rp*Ip**2
    P_Cu = R2linha *((I2linha)**2)
    Rend.append (P_variando / (P_variando + P_Fe + P_Cu))
    if (P_variando == 400*10**3):
        plena_carga = P_variando / (P_variando + P_Fe + P_Cu)

Rend = np.array (Rend)
P_percentual_nominal = np.array(P_percentual_nominal)

plt.title("Relação entre carga e rendimento do transformador.")
plt.xlabel("Carregamento do transformador (em % da potência nominal)")
plt.ylabel("Rendimento do transformador (%)")
plt.grid()
plt.plot(P_percentual_nominal, Rend);
print("No ponto de plena carga temos um rendimento de: {:.4f}".format(plena_carga))

```

No ponto de plena carga temos um rendimento de: 0.9885



Método de cálculo da Regulação

Para o cálculo da regulação do transformador temos a seguinte fórmula apresentada em sala de aula:

$$Regulação = \frac{V_{vazio} - V_{carga}}{V_{carga}}$$

Onde temos que E é a tensão no secundário com os terminais da carga em aberto, logo ficando igual a tensão do primário e V_s é a tensão que cai sobre a carga.

É uma medida do quão ideal é o transformador, pois se tende a zero quer dizer que desconsideramos todas as perdas.

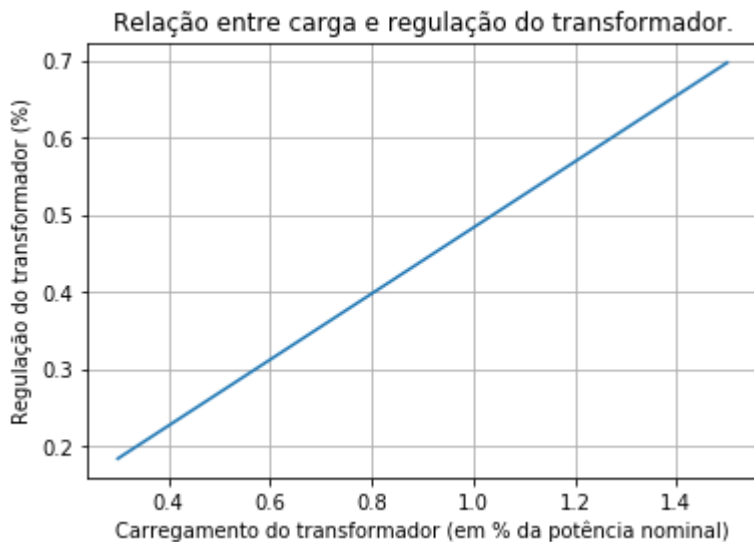
No ponto de plena carga, temos que a regulação é de 0.4839.

In [6]:

```
#Gráfico da regulação
Reg = []
fi = np.arccos (cosfi) # o Fi dá 0.55 rad = 31.51°
Zparalelo = complex(169,1290)#(10000*1313j)/10000+1313j
for P_variando in range (P_min, P_max):
    Zcarga = (320*complex(169.46,1290.76)*a**2)/P_variando #320 é a tensão em vazio
    Z2 = (Zparalelo*(0.24+0.33j+Zcarga))/(Zcarga+0.24+0.33j+Zparalelo) #Resistencia equival
    Vtotal = Z2*320/(Z2+0.5+0.67j)
    Vcarga = Vtotal*(Zcarga/(Zcarga+complex(0.24,0.33)))
    r = ((320 - Vcarga )/Vcarga)*100
    r = np.real(r)
    Reg.append(r)
    if (P_variando == 400*10**3):
        plena_carga = np.real(((320 - Vcarga )/Vcarga)*100)

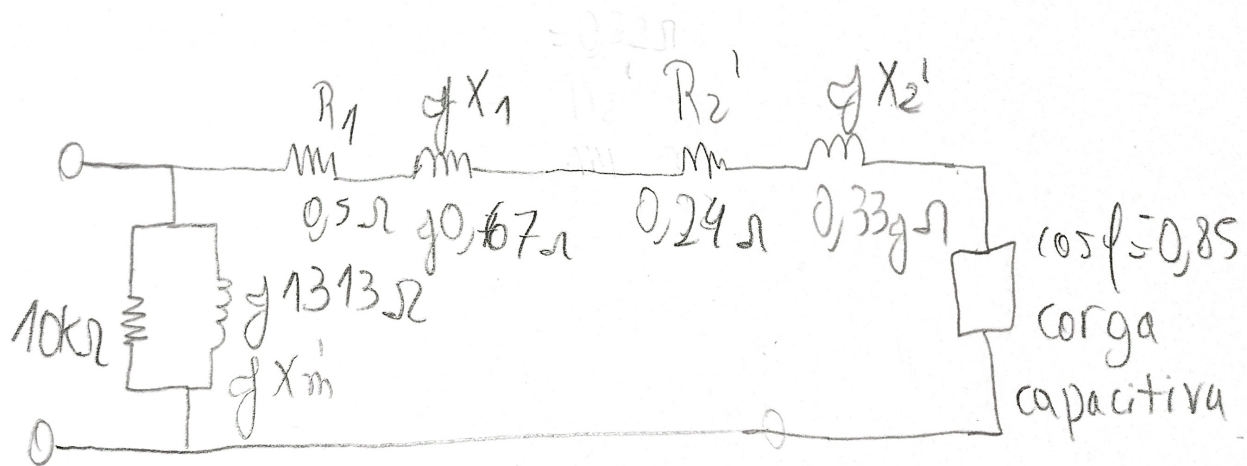
Reg= np.array(Reg)
plt.title("Relação entre carga e regulação do transformador.")
plt.xlabel("Carregamento do transformador (em % da potência nominal)")
plt.ylabel("Regulação do transformador (%)")
plt.grid()
plt.plot(P_percentual_nominal, Reg);
print("No ponto de plena carga temos uma regulação de: {:.4f}".format(plena_carga))
```

No ponto de plena carga temos uma regulação de: 0.4839



2. Cálculo dos parâmetros do circuito equivalente a fluxo constante

2.1. Desenho do circuito equivalente a fluxo constante



2.2. Gráficos para circuito equivalente a fluxo constante

Método de cálculo do Rendimento e da Regulação

O método utilizado é similar ao do 1.6.

No ponto de plena carga, temos que o rendimento é de 0.9778 e que a regulação é de 0.428.

In [7]:

```

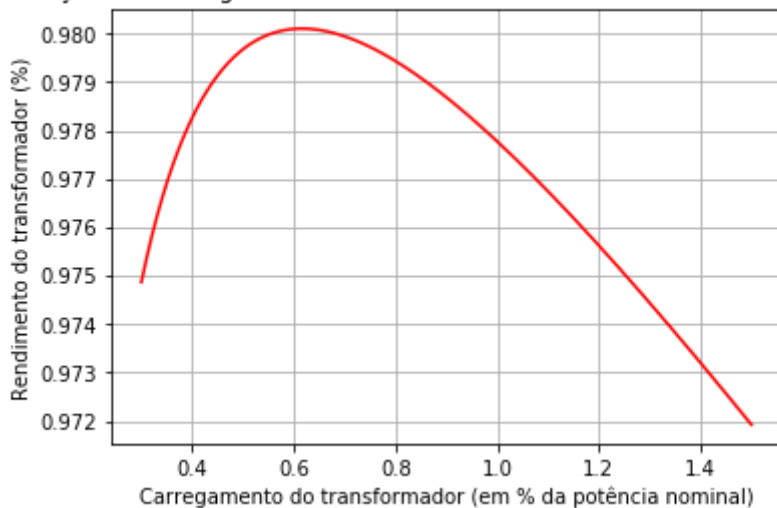
#Gráfico do Rendimento
import numpy as np
Rend_fluxo_cte = []
for P_variando in range (P_min, P_max):
    I2linha = P_variando/(V2*a*cosfi)
    P_Fe = Rp*Ip**2
    P_Cu = R2linha *((I2linha)**2) + R1 *(I2linha**2)
    Rend_fluxo_cte.append(P_variando / (P_variando + P_Fe + P_Cu))
    if (P_variando == 400*10**3):
        plena_carga = P_variando / (P_variando + P_Fe + P_Cu)

Rend_fluxo_cte = np.array (Rend_fluxo_cte)
plt.title("Relação entre carga e rendimento do transformador em fluxo constante.")
plt.xlabel("Carregamento do transformador (em % da potência nominal)")
plt.ylabel("Rendimento do transformador (%)")
plt.grid()
plt.plot(P_percentual_nominal, Rend_fluxo_cte,color="red");
print("No ponto de plena carga temos um rendimento de: {:.4f}".format(plena_carga))

```

No ponto de plena carga temos um rendimento de: 0.9778

Relação entre carga e rendimento do transformador em fluxo constante.



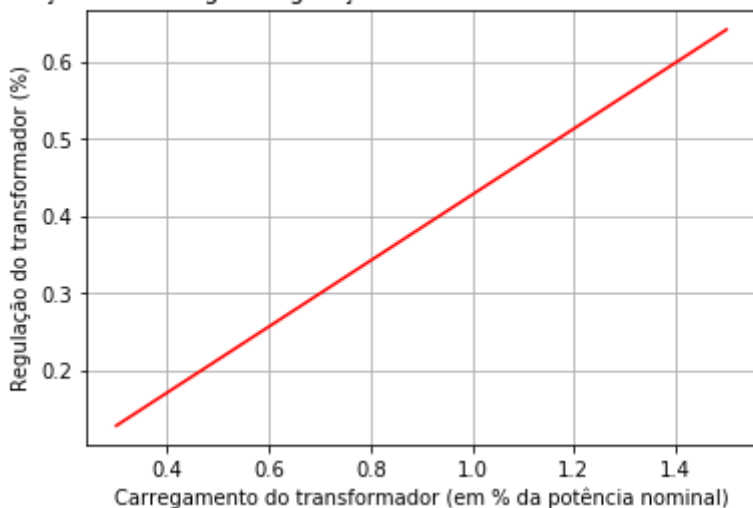
In [8]:

```
#Gráfico da regulação
Reg_cte = []
Zparalelo = complex(169,1290)#(10000*1313j)/10000+1313j
Rserie = complex(0.74,1)
for P_variando in range (P_min,P_max):
    Zcarga = (320*Zparalelo*a**2)/(P_variando)
    Vcarga = 320*(Zcarga/(Rserie+Zcarga))
    r = (320-Vcarga)/(Vcarga)*100
    r = np.real(r)
    Reg_cte.append(r)
    if (P_variando == 400*10**3):
        plena_carga = np.real(((320 - Vcarga )/Vcarga)*100)

Reg_cte= np.array(Reg_cte)
plt.title("Relação entre carga e regulação do transformador em fluxo constante.")
plt.xlabel("Carregamento do transformador (em % da potência nominal)")
plt.ylabel("Regulação do transformador (%)")
plt.grid()
plt.plot(P_percentual_nominal, Reg_cte ,color="red");
print("No ponto de plena carga temos uma regulação de: {:.4f}".format(plena_carga))
```

No ponto de plena carga temos uma regulação de: 0.4280

Relação entre carga e regulação do transformador em fluxo constante.

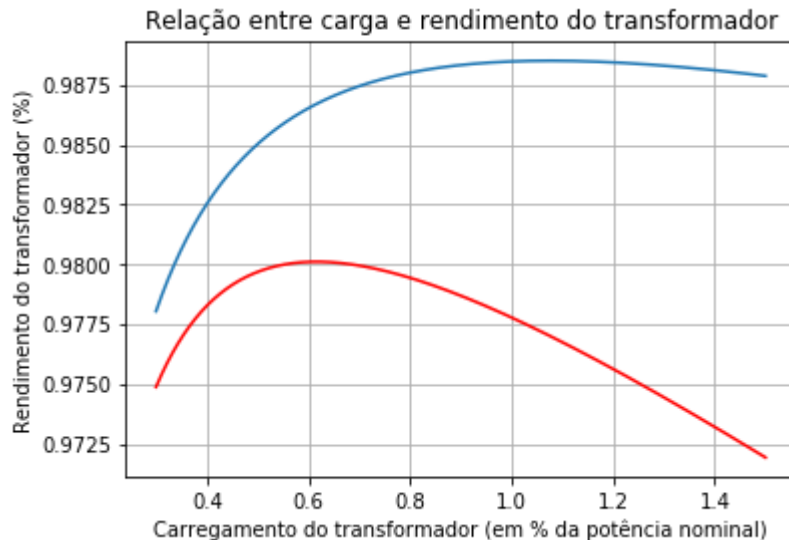


3. Comparação e comentários finais

Em azul, tem-se as curva do rendimento e da regulação para o modelo de fluxo não constante. Em vermelho, tem-se as curva do rendimento e da regulação para o modelo de fluxo constante.

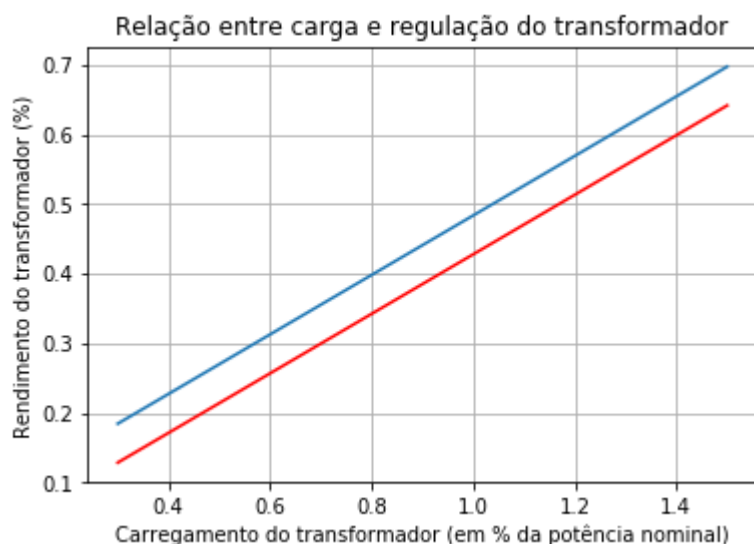
In [9]:

```
plt.title("Relação entre carga e rendimento do transformador")
plt.xlabel("Carregamento do transformador (em % da potência nominal)")
plt.ylabel("Rendimento do transformador (%)")
plt.grid()
plt.plot(P_percentual_nominal, Rend)
plt.plot(P_percentual_nominal, Rend_fluxo_cte,color="red");
```



In [10]:

```
plt.title("Relação entre carga e regulação do transformador")
plt.xlabel("Carregamento do transformador (em % da potência nominal)")
plt.ylabel("Rendimento do transformador (%)")
plt.grid()
plt.plot(P_percentual_nominal, Reg)
plt.plot(P_percentual_nominal, Reg_cte, color="red");
```



Modelos usados

No cálculo do rendimento:

- Modelo de fluxo não constante: adotou-se a seguinte estratégia: considerou-se as perdas no ferro constante (devido à baixa frequência (50 Hz)), independente da variação da carga. Além disso, para efeito

de simplificação nos cálculos, considerou-se a resistência equivalente no cobre como ($2 \times R_2$). Assim, conseguiu-se chegar em um modelo aproximado para o cálculo do rendimento.

- Modelo de fluxo constante: o cálculo do rendimento levou em conta que a corrente que passa por R_1 e R_2 em linha é a mesma. Dessa forma, a resistência equivalente do cobre para essa configuração é $R_1 + R_2$. Dessa forma, chegou-se a um modelo de cálculo de rendimento.

No cálculo da regulação:

- Fluxo não constante: considerou-se a tensão na carga em aberto como $V = 320V$. Logo, para calcular o V_{carga} , descontamos a tensão que recai sobre a impedância de dispersão.
- Fluxo constante: descontou-se as quedas de tensão nas duas impedâncias de dispersão que estão em série.

Conclusões

Tendo em vista as curvas dos modelos propostos no EC1 que são a de fluxo constante e a de não constante, temos claramente evidenciado diferença entre os rendimentos calculados.

No modelo de fluxo constante, o rendimento é sempre menor do que o do modelo de fluxo não constante, conforme apresentado no 1º gráfico da seção 3 deste relatório.

Além disso, pode-se notar também que a regulação do modelo de fluxo constante é maior do que a do fluxo não constante, logo temos que o transformador no primeiro caso tem mais perdas do que no fluxo não constante.