

ELECTROTECNIA TEÓRICA

MEEC

IST

2º Semestre 2017/18

2º TRABALHO LABORATORIAL

ESTUDO DE UM CIRCUITO MAGNÉTICO E DOS FENÓMENOS DE INDUÇÃO MAGNÉTICA ASSOCIADOS

Prof. V. Maló Machado

Prof. M. Guerreiro das Neves

Prof.^a M^a Eduarda Pedro

ELECTROTECNIA TEÓRICA

TRABALHO LABORATORIAL

ESTUDO DE UM CIRCUITO MAGNÉTICO E DOS FENÓMENOS DE INDUÇÃO MAGNÉTICA ASSOCIADOS

1. OBJECTIVOS

Pretende-se evidenciar o comportamento de um circuito magnético constituído por um núcleo de ferro e entreferros de ar. Em particular, pretende-se analisar e fazer medidas que esclareçam a dependência do fluxo com a corrente de excitação e com o tamanho dos entreferros.

Observar-se-á também o ciclo de histerese em regime alternado sinusoidal do fluxo, para várias situações.

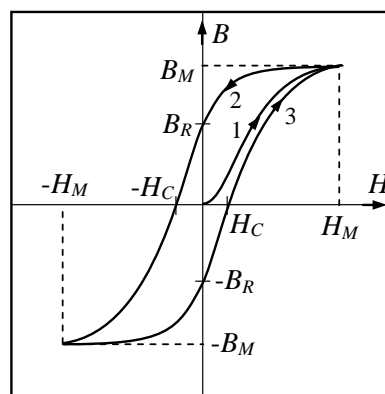
O princípio do método de medida ilustra ainda a aplicação da lei da indução.

2. NOTAS SOBRE OS FENÓMENOS DE SATURAÇÃO E HISTERESE

Num circuito magnético sem derivações – desprezando a dispersão – o circuito define um tubo de fluxo, e a equação $\text{div } \mathbf{B} = 0$ obriga a que o fluxo simples resultante numa secção do circuito magnético ϕ seja o mesmo em qualquer secção deste circuito.

Tomando a aproximação de considerar o campo uniforme, o valor da indução B numa secção vem imposto pela área da secção considerada, $B = \phi/S$, e o campo magnético pela relação $B = B(H)$ seguida pelo material, existente nessa região.

A relação $B = B(H)$ do ferro é não-linear, havendo saturação e histerese. Com o material desmagnetizado ($B = 0, H = 0$) a subida de H leva à subida de B numa relação (troço 1 da Fig. 1) que tem uma zona aproximadamente linear, até atingir a saturação. A subsequente diminuição de H faz diminuir B , mas por valores superiores (troço 2). Quando H se anula, fica uma “indução remanescente”, B_R . Para anular o campo de indução, é necessário baixar o campo H até $-H_C$, campo magnético coercivo. A diminuição até $(-H_M, -B_M)$ e nova subida de H completam o ciclo; a nova subida efectua-se pelo troço 3, diferente de 1 e 2. Os valores da indução remanescente (ou residual), e do campo coercivo, dependem dos máximos H_M, B_M atingidos.



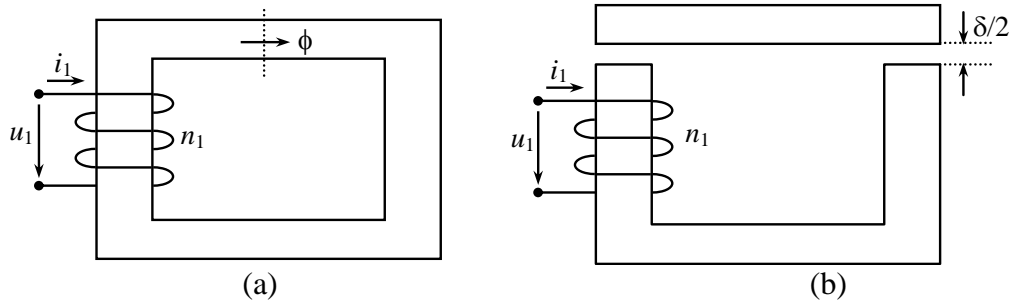
- Fig. 1 -

Uma forma de desmagnetizar o material é obrigá-lo a descrever ciclos progressivamente menores, em torno da origem. A alimentação em corrente alternada com uma tensão de amplitude decrescente é um processo cómodo de realizar a desmagnetização.

A área do ciclo, em unidades $B \times H$, mede a densidade volumétrica de energia (J/m^3) dissipada ao descrever-se um ciclo completo.

A lei de Ampère relaciona H com a força magnetomotriz (fmm), ou seja, com a corrente (no caso de haver uma só bobina de excitação).

A geometria relaciona B com ϕ , e o fluxo ligado com a bobina é $\psi_1 = n_1 \phi$. Assim, o ciclo da Fig. 1, noutra escala, representará a relação $\phi(fmm)$, ou, ainda noutra escala, $\psi_1(i_1)$. Nesta última, a área do ciclo representa a energia dissipada no volume do núcleo de ferro da bobina ao descrever-se um ciclo completo.



- Fig. 2 -

Se a alimentação for feita em corrente alternada, de frequência f , o ciclo é descrito f vezes por segundo. A área, na escala $\psi_1(i_1)$, multiplicada por f , dá a potência relativa às perdas magnéticas no núcleo de ferro.

Se a seção do circuito magnético for constante B é uniforme no núcleo; não havendo heterogeneidades H será uniforme em todo o circuito (Fig. 2.a). Sendo ℓ o comprimento médio das linhas de força do campo, vem:

$$\phi = BS \quad ; \quad \psi_1 = n_1 \phi \quad ; \quad fmm = n_1 i_1 = H \ell$$

No caso de haver dois pequenos entreferros, de espessura $\delta/2$ —ver Fig. 2.b— e se δ for muito menor que as dimensões transversais, manter-se-á $B_0 = B_{fe}$, pelo que $H_0 = B_{fe}/\mu_0$.

Na aplicação da lei de Ampère, virá:

$$fmm = n_1 i_1 = H_{fe} \ell + \frac{\delta}{\mu_0} B_{fe}; \quad \phi = BS \quad ; \quad \psi_1 = n_1 \phi$$

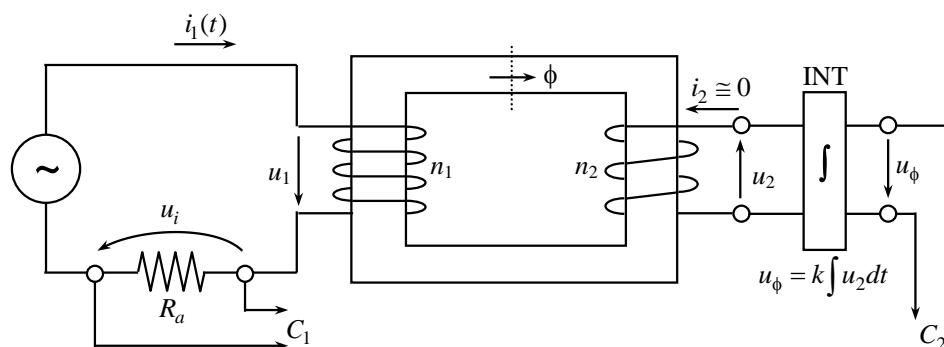
o que permite passar do conhecimento do ciclo de histerese para a característica do circuito com entreferro.

A lei da indução aplicada à bobina da Fig. 2.a dá $u_1(t) = r_1 i_1(t) + d\psi_1/dt$. Desprezando a resistência, vem $u_1(t) \cong d\psi_1/dt$. Se a tensão u_1 for sinusoidal também o fluxo $\psi_1(t)$ o será (bem como o próprio campo $B(t)$). Porém, sendo a relação $\psi_1(i_1)$ não-linear, então $i_1(t)$ resultará não sinusoidal. As quedas de tensão resistivas terão a forma da corrente e por isso manter-se-á a resistência do circuito tão baixa quanto possível a fim de se estar próximo da condição de fluxo sinusoidal.

3. ENSAIOS EM CORRENTE ALTERNADA

3.1 Princípio do ensaio

O esquema de princípio destes ensaios é o seguinte:



- Fig. 3 -

Em torno do núcleo há duas bobinas, a primária com n_1 espiras e a secundária com n_2 espiras, que será deixada em vazio ($i_2 = 0$).

A corrente na bobina primária, $i_1(t)$, provoca fluxo no núcleo, $\phi(t)$, o qual é sentido pela bobina secundária mediante, $\psi_2(t) = n_2 \phi(t)$. Com os sentidos indicados na Fig. 3, da lei da indução resulta $u_2(t) = -n_2 d\phi/dt$.

Esta tensão é aplicada a um bloco integrador, em cuja saída haverá

$$u_\phi = k \int u_2 dt = -k n_2 \int (d\phi/dt) dt ,$$

donde se conclui:

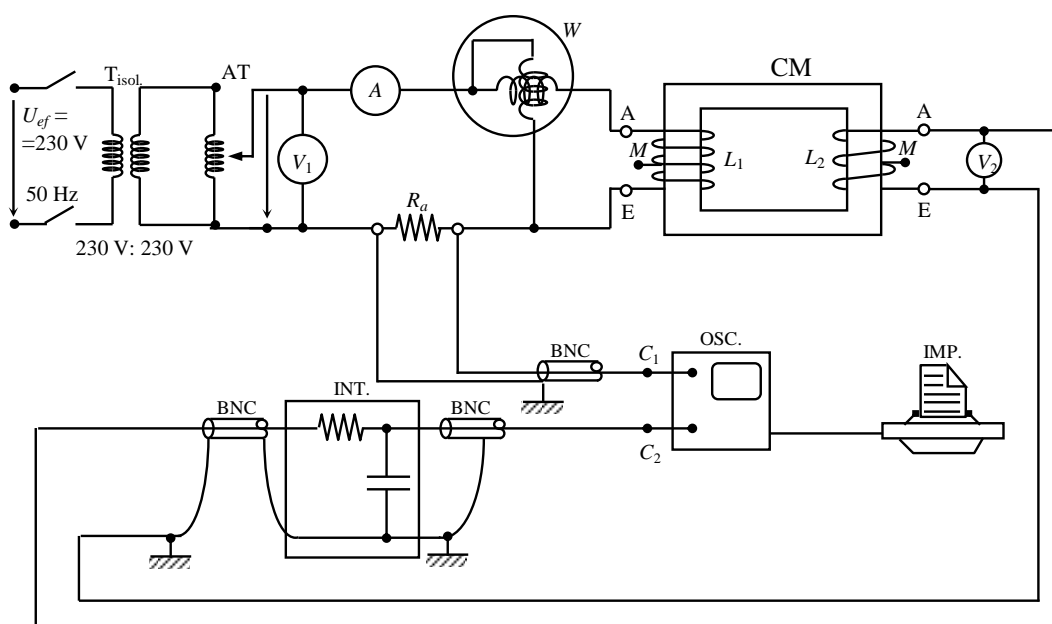
$$u_\phi = -k n_2 \phi(t) + C^{te} .$$

Em série com a bobina de excitação do núcleo está inserida uma resistência R_a , em cujos terminais surge uma tensão $u_i = i_1 R_a$. Assim, as tensões u_i e u_ϕ são representantes respectivamente de i_1 e ϕ , poderão ser observadas nos canais 1 e 2 de um osciloscópio, vendo-se imagens de $i_1(t)$ e $\phi(t)$; pondo o osciloscópio em modo “X-Y”, ver-se-á o ciclo de histerese.

3.2 Esquema de ligações e lista de material

3.2.1 Análise do esquema

O esquema de ligações está representado na Fig. 4.



- Fig. 4 -

3.2.2 Lista de material

Tisol. - Transformador de isolamento 230 V: 230 V; $P_s = 630$ VA

AT - Auto-transformador ZENITH.

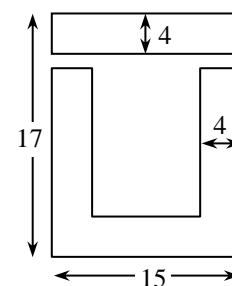
CM - Circuito magnético Leybold, constituído por pacotes de chapas, com travessa superior amovível, e secção quadrada constante; as dimensões, na Fig. 5, estão expressas em cm.

L_1 - Bobina Leybold 56214, $n_1 = 500$ esp, $r_1 = 2,5 \Omega$
 $(I_{ef})_{\max} = 2,5$ A.


L_2 - Bobina Leybold 56213, $n_2 = 250$ esp, $r_2 = 0,6 \Omega$, $I = 5$ A.

Ambas as bobinas têm 3 terminais: dois extremos (E,A) e um médio (M); usam-se os extremos.

R_a - Resistência com 1Ω (valor constante).



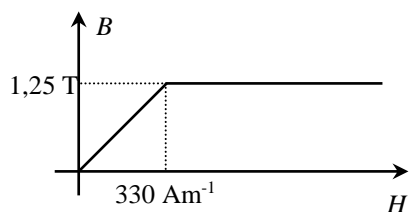
- Fig. 5 -

- V_1, V_2 - Voltímetros H&B, electrodinâmicos (verdadeiro valor eficaz), classe 0,5, 60-120-300-600 V.
- A - Multímetro, de verdadeiro valor eficaz, FLUKE 8010A.
- W - Wattímetro electrónico, analógico, SIEMENS 2GA 2990-4A.
- BNC - Cabos coaxiais com uma ou duas terminações BNC.
- OSC. - Osciloscópio digital TEKTRONIX TDS 200.
- INT. - Bloco integrador passivo, construído no laboratório;
 $k = 1/(RC) = 1 \text{ s}^{-1}$.
- IMP. - Impressora HP Deskjet 840C.
-  - Massas comuns, ligadas pelas blindagens dos cabos coaxiais BNC.

Observação: A Lista de Material acima descrita poderá não ser comum a todas as bancadas. Anote, no seu relatório, a lista de material efectivamente disponível na sua bancada.

4. DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento deve ser entregue na aula de laboratório, antes da realização do trabalho, sem o que o mesmo não poderá ser realizado!



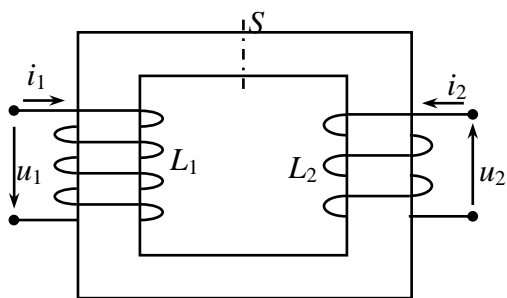
A característica do ferro do circuito magnético, não considerando a histerese, pode aproximar-se por uma zona linear, com um cotovelo de saturação definido por $B = 1,25 \text{ T}$ (Fig. 6).

- Fig. 6 -

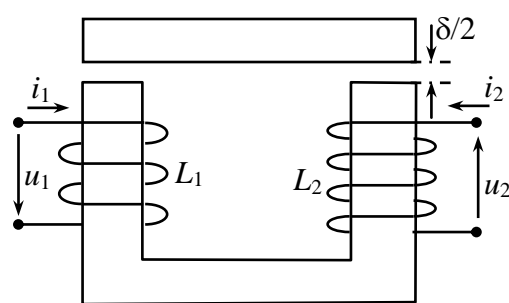
4.1

- a) Considere o circuito magnético da Fig. 7.a.

Por aplicação da lei do circuito magnético (lei de Ampère) determine a relação entre as correntes i_1 e i_2 e o campo magnético H na secção do núcleo. Faça uma figura com a indicação do caminho e normal utilizados na aplicação da lei do circuito magnético. Suponha que o circuito se encontra a operar na zona linear de funcionamento, isto é, $H < 330 \text{ Am}^{-1}$. Determine μ e μ_r .



- Fig. 7.a -



- Fig. 7.b -

- b) Com $i_2 = 0$, diga qual o valor máximo de i_1 para ter o circuito magnético a funcionar na zona linear.
- c) Determine as expressões que relacionam as correntes i_1 e i_2 com o fluxo do campo de indução magnética B na secção S , e com os fluxos ψ_1 e ψ_2 ligados com as bobinas L_1 e L_2 . Determine os coeficientes de auto-indução das bobinas, bem como o coeficiente de indução mútua.
- d) Com a bobina L_2 em vazio, sendo a tensão u_1 alternada sinusoidal com valor eficaz $U_{1ef} = 220 \text{ V}$ e frequência $f = 50 \text{ Hz}$, determine os valores eficazes e defasagens de i_1 , u_2 , ϕ , ψ_1 e ψ_2 . Despreze as resistências r_1 e r_2 .
- e) Repita d) supondo que a tensão u_1 foi regulada de forma a se ter $U_{2ef} = 35 \text{ V}$.
- f) Determine as relações entre u_ϕ e Ψ_1 , entre u_ϕ e B , e entre u_i e H .

4.2 Considere agora o circuito magnético da Fig. 7.b que inclui dois entreferros de ar de espessura $\delta/2$ cada, sendo $\delta = 4,1 \text{ mm}$. Despreze o campo magnético no interior das peças em ferro.

- a) Repita a alínea **4.1 a)** para este novo circuito.
- b) Repita a alínea **4.1 c)** para este novo circuito.

4.3 Preencha a tabela **R 4.3** do relatório.

5. EXECUÇÃO DO TRABALHO

CUIDADO: TENSÕES DISPONÍVEIS PERIGOSAS.
ACTUAR SEMPRE COM EXTREMA PRECAUÇÃO.

5.1 O esquema da Fig. 4 encontra-se montado. O amperímetro A deve ser ligado na escala dos 2 A. Verificar que o auto-transformador está regulado para zero antes de ligar a bancada.

Serão usados dois grupos de escalas no osciloscópio:

Escalas “A”: u_{ϕ} : 100 mV/div u_i : 1 V/div t : 5 ms/div

Escalas “B”: u_{ϕ} : 200 mV/div u_i : 500 mV/div t : 5 ms/div

5.2 Após a verificação das ligações pelo docente, ligue a bancada. No menu “MEASURE” do osciloscópio faça as regulações necessárias para medir o valor pico a pico e o valor eficaz, em ambos os canais. Regule a posição vertical nos dois canais do osciloscópio de modo a fazer coincidir o zero com a linha média do ecrã.

5.3 Regule a tensão u_1 de forma que $U_{1ef} = 220$ V .

- a) Anote na tabela **R 6.1** as leituras de V_1 , V_2 , A , W e U_{iM} (lido como metade do valor pico a pico no canal 1 do osciloscópio), $U_{\phi M}$ (lido como metade do valor pico a pico no canal 2 do osciloscópio) U_{ief} e $U_{\phi ef}$.
- b) Observe as formas de onda de $i_1(t)$ e $B(t)$ nos canais 1 e 2, respectivamente, do osciloscópio; obtenha cópias em papel das figuras nas escalas “B”.
- c) Passe o osciloscópio para o modo “X-Y”. Observe o ciclo de histerese. Obtenha cópia, em papel, do ciclo, na escala “B”.

5.4 Regule a tensão u_1 de forma que $U_{2ef} = 35$ V (verificando-se nesta situação que $U_{1ef} \approx 70$ V). Repita o procedimento de **5.3 a)** e anote as leituras na tabela **R 6.2 a)**.

5.5 Desça lentamente a tensão u_1 até zero e desligue a bancada. Retire a travessa amovível do núcleo, coloque um calço de 2,05 mm, e reponha a travessa. Ligue o amperímetro A na escala de 10 A. Suba a tensão u_1 de forma que $U_{2ef} = 35$ V.

- a) Repita o procedimento de **5.3 a)** com $U_{2ef} = 35$ V (verificando-se nesta situação que $U_{1ef} > 70$ V) e anote as leituras na tabela **R 6.3 a)**.

b) Repita os procedimentos de **5.3 b)** e c), mas com o osciloscópio na escala “A”.

5.6 Desça lentamente a tensão u_1 até zero. Desligue os aparelhos e a bancada.

6. RELATÓRIO

6.1 Ensaio realizado sem entreferros, com $U_{1ef} = 220$ V (ensaio descrito na alínea **5.3**).

- Calcule os valores de B_{\max} , $i_{1\max}$, e preencha a tabela **R 6.1 b**).
- Apresente as curvas de $B(t)$ e $i_1(t)$, com os eixos devidamente graduados, nas escalas “B”.
- Apresente o ciclo de histerese obtido, com os eixos (i_1, ψ_1) devidamente graduados nas escalas “B”.
- Histerese e perdas magnéticas no ferro
Estime a área do ciclo obtido em **5.3 c)** com $U_{1ef} = 220$ V – por exemplo, aproximando-o a um paralelogramo – exprimindo-a em J (joule). Calcule a potência de Joule $P_J = r_1(I_{1ef})^2$ na bobina, e verifique que é muito menor que a potência lida no wattímetro e apresentada na tabela **R 6.1 a)**. Verifique que esta é a soma das perdas de Joule com as perdas por histerese. Preencha a tabela **R 6.1 d)**.

6.2 Ensaio realizado sem entreferros, com $U_{2ef} = 35$ V (ensaio realizado na alínea **5.4**).

- Apresente os valores lidos no ensaio e calcule B_{\max} , $i_{1\max}$, Ψ_{1ef} e Ψ_{2ef} .
- Calcule os valores de $L_{11} = \frac{U_{1ef}}{\omega I_{1ef}} = \frac{\Psi_{1ef}}{I_{1ef}}$, $L_M = \frac{\Psi_{2ef}}{I_{1ef}}$ e $L_{22} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 L_{11}$.

Preencha a tabela **R 6.2 b)**.

6.3 Ensaio realizado com entreferros, $\delta = 4,1$ mm, e com $U_{2ef} = 35$ V (ensaio realizado na alínea **5.5**).

- Apresente os valores lidos no ensaio e calcule B_{\max} , $i_{1\max}$, Ψ_{1ef} e Ψ_{2ef} .
- Calcule os valores de L_{11} , L_M e L_{22} .
- Apresente as curvas de $B(t)$ e $i_1(t)$, com os eixos devidamente graduados, nas escalas “A”.

- d) Apresente o ciclo de histerese obtido, com os eixos (i_1, ψ_1) devidamente graduados nas escalas “A”.
- e) Comente, comparando com as curvas apresentadas em **6.1 b)** e **6.1 c)**.
- f) Comente as discrepâncias entre os valores de L_{11} calculados pelas duas expressões utilizadas.

O relatório tem que ser entregue no final da aula de laboratório e consiste no preenchimento da ficha apresentada em Anexo, à qual se devem juntar as curvas impressas, devidamente graduadas.

REFERÊNCIAS

J. A. Brandão Faria, ‘*Electromagnetic Foundations of Electrical Engineering*’, Wiley, 2008.
Cap. 4; Cap. 5.

IST, Fevereiro de 2018

ANEXO

RELATÓRIO DO 2º TRABALHO LABORATORIAL

R 4.3:

Cálculo das escalas de i_l , ψ_l e B

	i_l [A/div]	ψ_l [Wb/div]	B [T/div]
Escalas “A”			
Escalas “B”			

R 6.1 a) e 6.1 b):

Valores medidos em 5.3 a)

V_l [V]	V_2 [V]	A [A]	W [W]	U_{iM} [V]	$U_{\phi M}$ [V]	U_{ief} [V]	$U_{\phi ef}$ [V]

Cálculo de B_{max} , i_{lmax} .

B_{max} [T]	i_{lmax} [A]

R 6.1 d):

Estime a área do ciclo W_{ciclo} (energia dissipada no núcleo de ferro num ciclo completo), calcule a potência de perdas magnéticas P_{ciclo} e a potência de perdas de Joule P_J .

W_{ciclo} [J]	P_{ciclo} [W]	P_J [W]	$P_{ciclo+P_J}$ [W]

Verificação da igualdade entre o valor lido no wattímetro (tabela 6.1 a)) e a potência total de perdas.

W [W]	$P_{ciclo+P_J}$ [W]

R 6.2 a) e 6.2 b):

Valores medidos em 5.4

V_l [V]	V_2 [V]	A [A]	W [W]	U_{iM} [V]	$U_{\phi M}$ [V]	U_{ief} [V]	$U_{\phi ef}$ [V]

Cálculo de B_{max} , i_{lmax} , Ψ_{1ef} , Ψ_{2ef} , L_{11} , L_M e L_{22}

B_{max} [T]	i_{lmax} [A]	Ψ_{1ef} [Wb]	Ψ_{2ef} [Wb]	$L_{11} = \frac{U_{1ef}}{\omega I_{1ef}}$ [H]	$L_{11} = \frac{\Psi_{1ef}}{I_{1ef}}$ [H]	L_M [H]	L_{22} [H]

R 6.3 a), 6.3 b) e 6.3 e):

Valores medidos em 5.5

V_1 [V]	V_2 [V]	A [A]	W [W]	U_{iM} [V]	$U_{\phi M}$ [V]	U_{ief} [V]	$U_{\phi ef}$ [V]

Cálculo de B_{max} , i_{lmax} , Ψ_{1ef} , Ψ_{2ef} , L_{11} , L_M e L_{22}

B_{max} [T]	i_{lmax} [A]	Ψ_{1ef} [Wb]	Ψ_{2ef} [Wb]	$L_{11} = \frac{U_{1ef}}{\omega I_{1ef}}$ [H]	$L_{11} = \frac{\Psi_{1ef}}{I_{1ef}}$ [H]	L_M [H]	L_{22} [H]

Comentários: _____

Número	Nome	Auto-Aval. [%]