



Segundo Exercício Computacional – Indutância e Força Magnética em Solenoide com Êmbolo

(Entrega até 02/06/2020)

O objetivo deste trabalho é a determinação da indutância própria e da força magnética desenvolvida por um solenoide cilíndrico com êmbolo através de simulação computacional. A Fig. 1 mostra a geometria desse atuador eletromecânico e representa um corte axissimétrico do mesmo, sendo z o eixo de revolução; r indica a distância radial, a partir do eixo z .

Estão indicadas na Fig. 1 as partes fixa e móvel (êmbolo) da estrutura, ambas constituídas de material ferromagnético, além da bobina de excitação do dispositivo e dos entreferros superior (fixo) e inferior (variável). O êmbolo pode se movimentar apenas na direção axial, z .

A determinação da indutância e da força magnética devem ser realizadas a partir de uma Simulação Computacional Eletromagnética (Magnetostática). Para tanto será utilizado um software baseado no Método dos Elementos Finitos, de distribuição livre, o **FEMM**, que pode ser baixado da URL: <http://www.femm.info/wiki/Download>. A página dispõe também de diversos tutoriais, que podem igualmente ser obtidos de outras fontes. Há também farta oferta de vídeos tutoriais do **FEMM** no YouTube.

A Fig. 1 foi gerada a partir do Modelador Geométrico desse programa. O arquivo de projeto do **FEMM** para esse dispositivo encontra-se disponível no e-DisciplinasUSP, juntamente a este documento: *solenoides_ec2.FEM*.

Além da geometria, a Fig. 1 inclui informações dos materiais que compõem o domínio de estudo: o material ferromagnético do núcleo, μ_{1000} ; material e propriedades da bobina, de fio 10 AWG com $N = 1000$ espiras, pela qual circula corrente de 1,0 A ($NI = 1000$ A). O restante do domínio é composto de ar. As condições de contorno do problema já foram impostas e estão incluídas no arquivo do projeto.

Atenção: as dimensões na Fig. 1 e no arquivo de projeto estão todas em centímetros.

Antes de realizar as simulações a partir do arquivo de projeto fornecido, será necessário efetuar pequenas alterações nos dados desse arquivo, que envolvem materiais, posições do êmbolo e dos entreferros.

O exercício poderá ser realizado em grupos de até 3 alunos, todas de uma mesma turma de PEA3306. As modificações necessárias no arquivo de dados dependerão unicamente dos valores mostrados na Tabela I, e estes deverão ser escolhidos de acordo com a sua turma de PEA3306 (1 - Viviane, 2 - Leb ou 3 - Salles) e com os 3 últimos algarismos do seu número USP (NUSP **U** é o último algarismo, NUSP **P**, o penúltimo e NUSP **A**, o antepenúltimo) do primeiro aluno do grupo em ordem alfabética.

A partir dos resultados das simulações, cada grupo deverá gerar um relatório com os resultados, de acordo com modelo do Google Docs fornecido. Um arquivo em formato PDF deve ser gerado a partir desse documento e submetido em link apropriado no eDisciplinasUSP.

Ao final deste documento é fornecido um breve tutorial com comandos básicos do FEMM, que serão necessários para efetuar as modificações e simulações solicitadas.

Os passos para a realização deste exercício são dados a seguir.

- 1) Utilizar os valores dimensionais e o número de espiras (N) da bobina obtidos da Tabela I. O valor do entreferro **inferior** deve ser ajustado para 5 valores distintos, de 1 mm a 5 mm, com intervalos de 1 mm. Para cada valor de entreferro **inferior**, e admitindo permeabilidade infinita para o núcleo, calcular **analiticamente** os valores da indutância própria da bobina e da força magnética no êmbolo.
- 2) Abrir o arquivo *solenoides_ec2.FEM* com o FEMM, e modificar os dados dimensionais e de N conforme a Tabela I, exceto o material do núcleo, que deve ser mantido em μ_{1000} (permeabilidade relativa de 1000). O entreferro **inferior** deve ser ajustado conforme o item 1). Para cada valor de entreferro **inferior** deve-se gerar a malha de elementos finitos, executar a simulação e, por fim, obter os valores

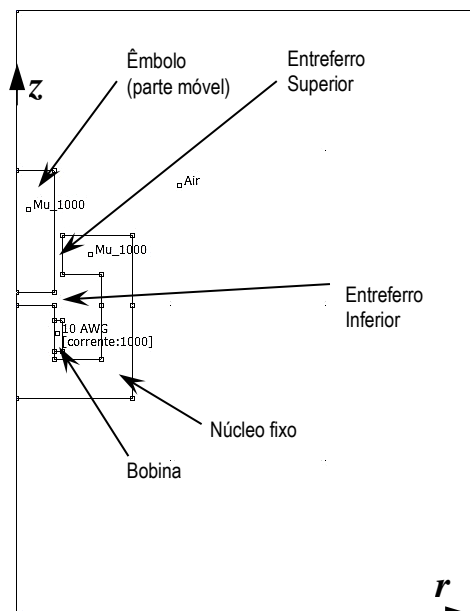


Fig. 1 Solenoide com êmbolo: corte axissimétrico com componentes e materiais.



PEA 3306 2020

da indutância própria da bobina e da força magnética sobre o êmbolo. Os comandos indicados são descritos sucintamente ao final deste documento.

- 3) Repetir o item 2), porém, modificando agora o material do núcleo, de μ_0 1000 para aquele indicado na Tabela I.

O relatório final a ser entregue deverá conter:

- I. [1,0] Apresentação adequada (clareza, concisão, legibilidade, coesão, escolha adequada de escalas, reprodutibilidade e organização geral do documento. Usar o “template” Google Docs disponibilizado no eDisciplinasUSP como modelo.).
- II. [0,5] Introdução contendo todos os dados utilizados no trabalho pelo grupo.
- III. [0,5] Equacionamento algébrico do item 1), comentado, e resultados numéricos para entreferro inferior de 1 mm.
- IV. [1,0] Imagens relevantes das simulações realizadas no item 3) e com entreferro inferior de 5 mm, incluindo (i) a geometria (semelhante à Fig. 1), (ii) a malha de elementos finitos, (iii) as janelas pop-up com os valores da indutância e da força magnética e (iv) a distribuição das linhas de densidade de fluxo magnético. (v) Incluir também distribuição da densidade de fluxo para o entreferro inferior de 1 mm.
- V. [1,0] Análise comparativa (qualitativa) das distribuições das linhas de fluxo acima, para 1 e 5 mm de entreferro, comentários e conclusões.
- VI. [2,0] Tabela comparativa dos valores da **Indutância Própria** da bobina **em função do entreferro inferior**, obtidos nos itens 1), 2) e 3) (analítico, numérico-linear e numérico-não linear). Traçado dos 3 gráficos de Indutância em função do entreferro inferior nas 3 situações (utilizando um único sistema de eixos; não serão aceitos três gráficos independentes). A tabela deve incluir o desvio percentual dos resultados numéricos em relação ao analítico.
- VII. [2,0] Tabela comparativa dos valores da **Força Magnética** sobre o êmbolo **em função do entreferro inferior**, obtida nos itens 1), 2) e 3). Traçado dos 3 gráficos de Força em função do entreferro inferior nas situações dessa tabela comparativa (utilizando um único sistema de eixos; não serão aceitos três gráficos independentes). A tabela deve incluir o desvio percentual dos resultados numéricos em relação ao analítico.
- VIII. [2,0] Análise comparativa dos resultados (quantitativa e qualitativa) apresentados nos itens VI e VII, comentários e conclusões.

TABELA I

Dados dimensionais e propriedades físicas para a simulação, em função da Turma e do NUSP

Turma	Nº espiras	x	NUSPx	Material	y	NUSPy	Entreferro Superior (cm)
Viviane (1)	500	A	0,1,2,3	M-15 Steel	P	0,1,2,3	0,20
			4,5,6	1006-Steel		4,5,6	0,30
			7,8,9	Pure iron, annealed		7,8,9	0,40
Leb (2)	400	P	0,1,2,3	1006-Steel	U	0,1,2,3	0,10
			4,5,6	Pure iron, annealed		4,5,6	0,20
			7,8,9	M-15 Steel		7,8,9	0,30
Salles (3)	600	U	0,1,2	Pure iron, annealed	A	0,1,2	0,15
			3,4,5	M-15 Steel		3,4,5	0,25
			6.7.8.9	1006-Steel		6.7.8.9	0,35

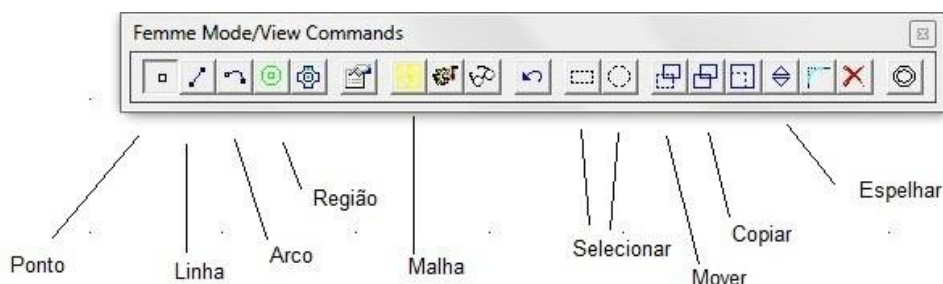


**DICAS RÁPIDAS DE UTILIZAÇÃO DO FEMM**

Fig. 2 - Ícones de comandos básicos do FEMM.

Selecionar um ponto: clicar no botão de ponto (Fig. 2). Usar um dos botões “Selecionar” para escolher um ponto da geometria. Ele deverá ficar na cor vermelha. Para movê-lo, usar o botão “Mover”.

Selecionar uma reta: usar os botões “Selecionar” para escolher os pontos que definem a reta. Eles deverão ficar na cor vermelha. Para movê-los, usar o botão “Mover”.

Selecionar uma região: clicar inicialmente sobre o botão . Escolher uma das regiões de estudo e inserir um ponto nessa região. Usar um dos botão “Selecionar”  para selecionar esse ponto. Ele deverá ficar na cor vermelha. Para atribuir alguma propriedade a ele, clicar na sequência de menus:

Operation → *Open selected* → *Block type* (para especificar o tipo de material)

Operation → *Open selected* → *Circuit* (para especificar o circuito e o número de espiras)

Gerar a malha de elementos finitos: clicar sobre o botão com quadradinho amarelo. Caso o projeto ainda não esteja salvo, será solicitado.

Resolução (execução da simulação): clicar no botão da engrenagem (*Run Analysis*).

Traçar linhas de campo: concluída a resolução, clicar em *View Results* (botão óculos). Abre-se nova janela (*solenoid_ec2.ans*). A barra de botões desta nova janela é similar à mostrada na Fig. 3. Clicar sobre o botão com quadradinho preto e branco (linhas equipotenciais) ou sobre o quadradinho colorido (equipotenciais em *ColorMap*).

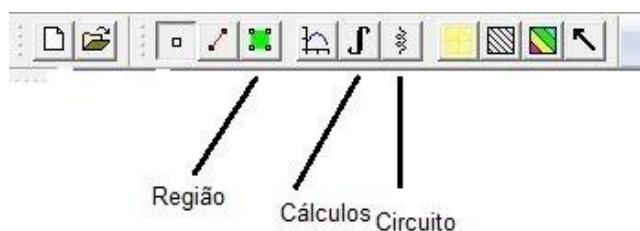


Fig. 3 – Ícones dos comandos da Janela de Visualização de Resultados.

Cálculo da Indutância: usar o botão “Circuito” da Janela de Resultados (Fig. 3).

Cálculo da Força: (i) primeiro deve-se selecionar a região, clicando no botão “Região” e selecionando a região móvel do solenoide na janela de desenho; (ii) em seguida, selecionar a forma de cálculo, clicando no botão “Cálculos” e depois na opção *Force via Magnetic Stress Tensor*.