

FEMM - Finite Element Method Magnetics

- Um breve tutorial -

Fleury J. de O. Filho* Henrique M.J. Barbosa†

São Paulo, 6 de outubro de 2009 – Segunda versão

1 Introdução

Muitas vezes nos deparamos no dia-a-dia com problemas físicos que devido à geometria, condições de contorno e complexidade são impossíveis de serem resolvidos analiticamente, mesmo sabendo as leis e teorias que regem o sistema. Uma maneira de resolver tais problemas é a partir do uso de sistemas computacionais que simulam e calculam numericamente as condições reais do sistema em análise.

As leis físicas são normalmente regidas por equações diferenciais parciais e estas podem ser tratadas numericamente a partir do método das diferenças finitas¹, neste método calcula-se os valores de funções contínuas em um número finito de pontos, normalmente espaçados de maneira regular. Estes pontos, sob os quais se deseja conhecer a função, são comumente chamados de *grid* ou *mesh*.

O FEMM (Finite Element Method Magnetics) é um programa para Windows que resolve problemas de elementos finitos para qualquer geometria em duas dimensões, ou em três dimensões quanto trata-se de problemas com simetria axial. É possível rodar o programa também no sistema operacional Linux através do emulador Wine com praticamente a mesma eficiência.

*Endereço eletrônico: fjofilho@gmail.com

†Endereço eletrônico: hbarbosa@if.usp.br

¹Um rápido comentário sobre a relação entre diferenças finitas e derivadas pode ser encontrada no site: http://en.wikipedia.org/wiki/Finite_difference

Com o auxílio do software FEMM é possível resolver problemas de magneto ou eletrostática, fluxo de calor, e corrente. Este programa possui ainda uma interface gráfica para o pre (desenho do experimento) e o pos (gráfico dos resultados) processamento. A partir da versão 4.2 ainda inclui “toolboxes” para integração com o Octave/Matlab e com o Mathematica.

O FEMM é distribuído gratuitamente sob a licença “Aladdin Free Public License”. O programa não tem garantia mas conta com uma página na internet com manuais, FAQ e listas de discussão: <http://www.femm.info>

Neste manual, faremos como exemplo a simulação do campo magnético das bobinas de um seletor de velocidades.

2 Tomada de dados

Para comparar de maneira apropriada os dados obtidos no laboratório com os resultados da simulação do FEMM é preciso desenhar exatamente a mesma configuração experimental utilizada na tomada de dados.

Lembre-se, queremos simular o campo magnético das bobinas do seletor de velocidades sendo então necessário anotar as características dos materiais utilizados, bem como a disposição física na qual se encontravam estes materiais.

Desta forma, você precisará das largura e espessura da bobina, além dos raios interno e externos, número de espiras e resistência. Do arranjo experimental, você vai precisar da corrente e da separação entre as duas bobinas para que seja possível realizar a simulação.

Após coletar os dados relevantes pode-se realizar a simulação a fim de comparar os dados experimentais com os dados teóricos referentes ao problema. Lembre-se que o programa não é uma caixa-preta que descobre a solução automaticamente, ele resolve numericamente as equações físicas do problema, caso tenha interesse de entender como o programa funciona dê uma lida nos slides referentes à aula 06 nas Notas de Aula do curso FGE-213/2009 do professor Alexandre Suaide.²

²As notas do professor Suaide encontram-se em <http://www.dfn.if.usp.br/suaide/>

3 Fazendo a simulação

Neste tutorial a seguinte notação será empregada: o que estiver **entre aspas** refere-se única e exclusivamente aos ícones que encontram-se na parte superior da tela do programa FEMM.

Vamos a simulação. Ligue o programa *FEMM*, clique em “File, New...” e escolha a opção *Magnetics Problem*, como pode-se ver na figura 3.1. A seguir, clique em “Problem” e defina as condições do problema, figura 3.2.



Figura 3.1: Escolhendo o problema.

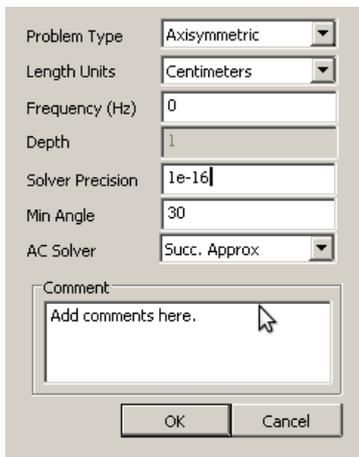


Figura 3.2: Definindo as condições do problema.

Ao escolher a opção *Axisymmetric Problem*, figura 3.2, impõem-se que haja um eixo de simetria axial, desta forma, não é necessário que se desenhe as bobinas em 3-D.

Lembre que quando um problema tem simetria axial um bom sistema de coordenadas é o sistema cilíndrico com coordenadas (r, θ, z) . No nosso problema o eixo horizontal representa a coordenada r enquanto o eixo vertical, a coordenada z . Quando o mouse esta sobre um ponto qualquer do desenho, o FEMM mostra as coordenadas daquela posição. Como foi escolhido *Axisymmetric* então as coordenadas são r e θ .

Tudo que se desenhar será rotacionado em 2π tendo como eixo de rotação a coordenada $r = 0$, no entanto, como será visto, pode-se desenhar a configuração para um r qualquer desde que o mesmo tenha como eixo de simetria a borda esquerda.

Assim, um único ponto com raio $r > 0$, ou seja, a direita da borda esquerda, representa um aro de raio r centrado na borda esquerda.

Para facilitar o processo clique em “Grid, Snap to Grid”, desta forma impõem-se que os pontos a serem desenhados estejam alinhados à malha. Defina também o tamanho da malha como múltiplo de 0.1cm clicando no botão *grid size* que está no lado esquerdo da tela, vejam figura 3.3.

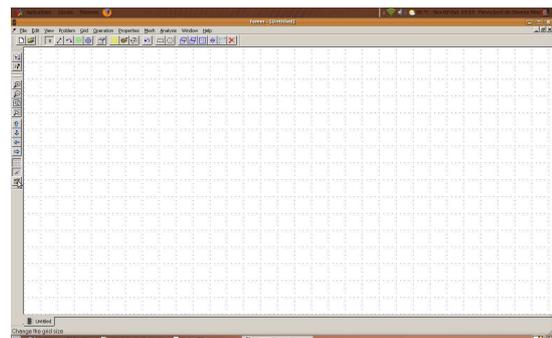


Figura 3.3: Escolhendo o tamanho da malha.

3 Fazendo a simulação

IMPORTANTE: salve antes de proseguir e, para facilitar o processo de desenho, use as ferramentas “Edit, Copy” e “Edit, Move”.

Defina uma borda para o problema, de preferência faça um retângulo de lados vertical \times horizontal = $80\text{cm} \times 40\text{cm}$ no mínimo. Use valores em que seja fácil de desenhar o arranjo experimental de forma simétrica.

Vamos então inciar desenhando as bordas do problema. Desenhe primeiramente os vértices da borda, “Operation, Nodes”, e ligue-os em seguida, “Operation, Segment”. Na figura 3.4 pode ser ver as bordas do problema desenhadas. Estas bordas definem a região na qual as equações do eletromagnetismo serão resolvidas. Nenhum campo será calculado fora desta região!

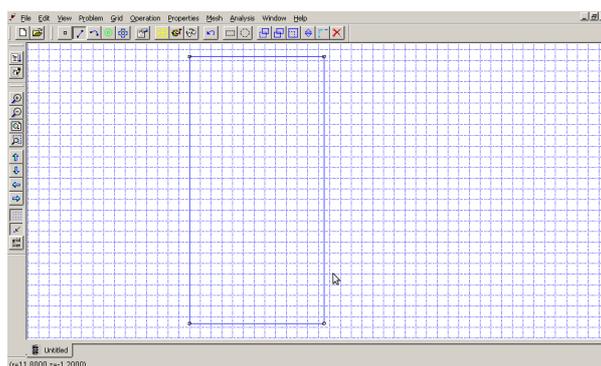


Figura 3.4: Exemplo de borda. Note que neste exemplo tem-se bordas menores que $80\text{cm} \times 40\text{cm}$.

Quero desenhar bobinas, no entanto, uma bobina é composta por vários fios concêntricos, como faço para desenhá-las?

A maneira mais simples é definir um objeto que tenha as dimensões da bobina e que seja feito de fios. A este objeto estão associados características bem conhecidas como: espessura do fio, números de voltas dos fios, corrente...

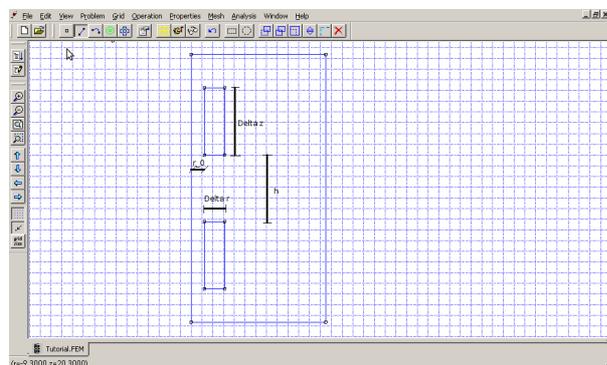


Figura 3.5: Desenho das bobinas. Note que r_0 define o raio da bobina, Δr , a espessura da bobina e Δz , a largura da mesma, h define a distância entre as bobinas.

Lembre que tudo que for desenhado será rotacionado tendo como eixo de simetria a borda vertical esquerda, assim, para desenhar uma bobina basta desenhar um retângulo em que Δz representa a largura da bobina, Δr , a espessura do conjunto de fios e r_0 a distância ao centro da bobina. É importante também conhecer a distância h entre as bobinas. Na figura 3.5 tem-se uma representação das variáveis do problema.

Desenhado o problema vamos definir as variáveis do mesmo. Primeiramente vamos definir

3 Fazendo a simulação

os meios: ar e bobina. Clique em “Properties, Materials, Add Property” e crie os dois materiais como pode ser visto na figura 3.6. Note que o materia **bobina** foi definido como sendo feito de

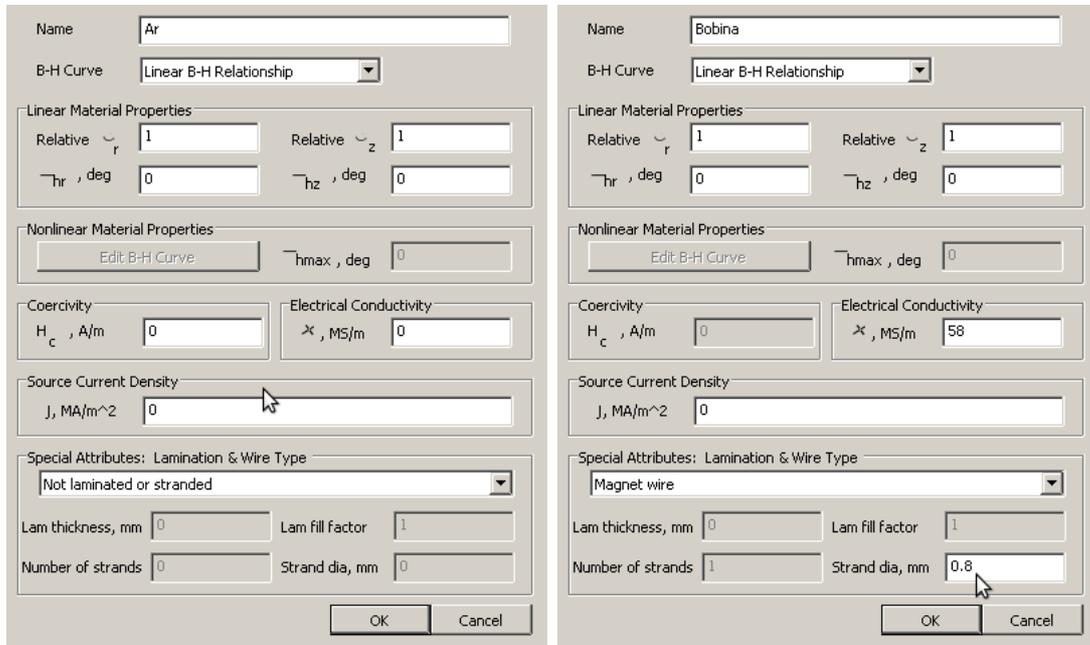


Figura 3.6: Criando os meios materiais.

Magnet wire, com diâmetro 0.8mm e condutividade elétrica de $58\text{MS}/\text{m}$, este último parâmetro define que os fios da bobina são de cobre. Crie também as bordas em “Properties, Bondary, Add Property” e os fios “Properties, Circuits, Add Property”, como visto em 3.7, lembre de informar ao programa a corrente que foi usada por você.

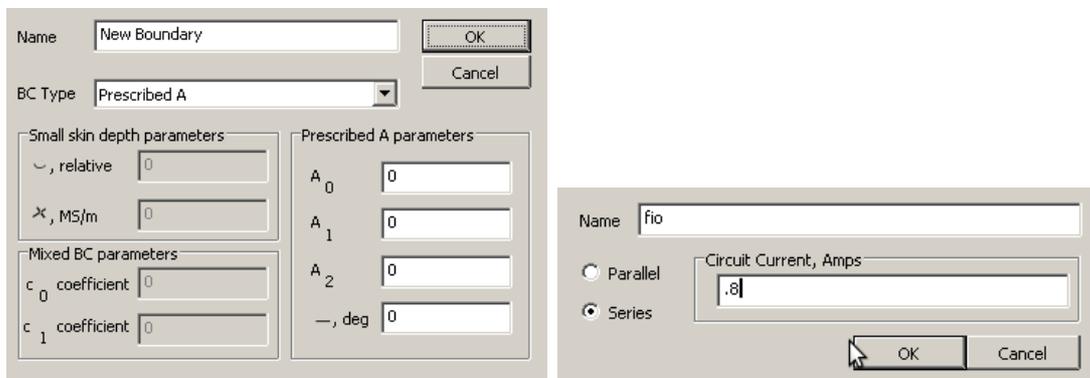


Figura 3.7: Criando as bordas e os fios.

Dentro de cada representação de bobina desenhe um “Operation, Block” que será o guia

4 Maneira alternativa

para que possamos criar de fato as bobinas e fora destas desenhe um outro “Operation, Block” para ser possível indicar o ar que permeia o espaço. Defina os meios e as bordas em “Operation, Open Selected” após selecionar ou o meio ou a borda.

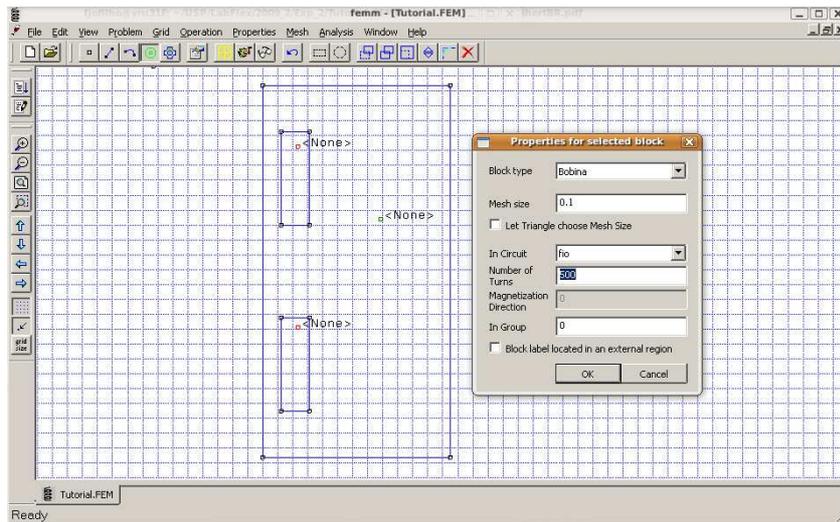


Figura 3.8: Definindo as bobinas com 500 voltas de fios.

Na figura 3.8 pode-se ver a bobina sendo definida. A bobina contem 500 voltas de **fio**. Note ainda que foi definido um $Mesh = 0.1$, é isso que define quantos triângulos serão usados na simulação computacional. De maneira similar defina o ar e as bordas.

Bem agora o programa está pronto para fazer a simulação. Crie uma reta sob a qual quer medir o campo magnético³, clique em “Mesh, Create Mesh” para criar os triângulos, **salve novamente** e “Analysis, Analyze” para fazer a simulação propriamente dita.

Provavelmente aparecerá a mensagem de erro dizendo que *o raio deve ser maior ou igual a zero*. Clique então no botão da lupa sobre uma folha de papel que está no lado esquerdo da tela e repita o procedimneto do parágrafo anterior.

4 Maneira alternativa

Caso não queira fazer uma bobina composta por fios de cobre pode-se também criar um objeto com as dimesões das bobinas e que tem uma densidade de corrente compatível com a corrente usada, como descrito na figura 4.1.

³Espero que TODOS saibam onde deve estar tal reta.

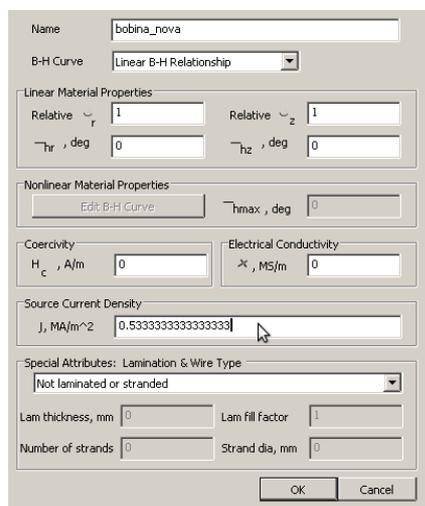


Figura 4.1: Nova definição das bobinas em que uso a densidade de corrente definida em 4.1.

$$\text{densidade de corrente} = \frac{\# \text{ de voltas} \times \text{corrente}}{\text{área da bobina}} \quad (4.1)$$

Note que o programa usa como unidades, [densidade de corrente] = $\text{MA}/\text{m}^2 = 10^6 \text{A}/\text{m}^2$.

Em seguida repita os passos da seção anterior, definindo quem são as bobinas, os meios materiais e as bordas.

5 Resultados

Feito o desenho e a análise, “Analysis, Analyze”, pode-se visualizar o resultado da simulação clicando em “Analysis, View Results”. Na figura que segue, 5.1, tem-se o resultado da simulação. Nesta figura, é possível ver as linhas de campo magnético bem como a reta sob a qual será medido o campo.

Em seguida, clique em “Plot X-Y, B.n (Normal flux density)” com a condição *Write data to text file* selecionada para criar um arquivo .txt com os dados.

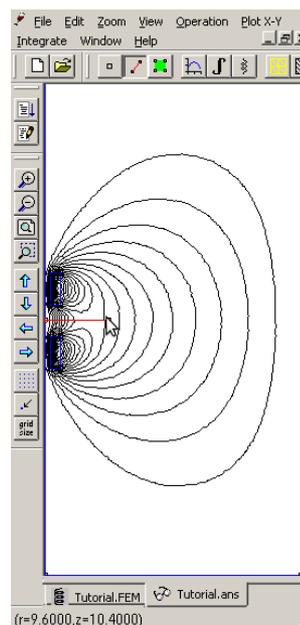


Figura 5.1: Linhas de campo geradas a partir da simulação com o programa FEMM.

Voilà! Boa sorte!